



Les défis environnementaux du XXI^e siècle



Les défis environnementaux du XXI^e siècle

Tome 1

Édition 2020

Ivar Ekeland
Aicha Ben Dhia

Illustrations : Margot Malpote pour 2050

Avant-propos





Marie Ekeland

C'était la fin des années 90. L'heure était à la révolution numérique, et je parlais, emplie de curiosité, d'énergie et d'enthousiasme, participer à l'avènement de cette nouvelle ère depuis New York. Clavier à la main, je codais, développant les algorithmes et les interfaces qui remplaceraient les mains levées et les ordres criés aux bourses de Wall Street ou de Paris.

Vint l'an 2000. Les startups s'installaient à Paris malgré la bulle. Le capital-risque aussi, que je découvrais et que je n'ai pas quitté depuis. Je m'attelais à comprendre, au-delà de la technologie, quels étaient la nature, les enjeux, les conséquences, les opportunités et les risques de cette révolution numérique. Comment elle reconfigurait nos modes de vie, nos organisations sociales et nos équilibres économiques. Pour l'accompagner au mieux.

Défilèrent les années 2010. L'avènement des réseaux sociaux, du bitcoin, de l'intelligence artificielle, de la réalité virtuelle. Je comprenais qu'au-delà d'accompagner la révolution numérique, il convenait de choisir ce à quoi l'on voulait qu'elle contribue. Parce que le numérique peut le meilleur comme le pire, et que la finance agit en amplificateur, les deux offrant une puissance d'agir formidable au service de demain. Mais pour quel « demain » ?

Nous sommes en l'an 2020. L'année Covid, l'année masquée. L'heure est à la mutation fertile. Un cycle de transformations redémarre et je sens m'envahir les mêmes curiosité, énergie et enthousiasme qu'il y a 25 ans. Les époques se répondent : une nouvelle fois les jeunes, les chercheurs et les entrepreneurs sont à l'avant-garde, une nouvelle fois cette mutation touche tous les secteurs, tous les continents, toutes les personnes, une nouvelle fois la rapidité à laquelle il nous faut nous adapter aux nouveaux usages nous surprend et dépasse les organisations, encore en train d'absorber la révolution précédente.

Je reprends le cycle au début : comprendre ce qu'il se passe. La mutation fertile repose fondamentalement sur l'adaptation aux bouleversements environnementaux que nous vivons : réchauffement climatique et perte de biodiversité. C'est l'objet de ce livre que de commencer à les décrypter en profondeur, dans toutes leurs dimensions, afin de construire un savoir précieux qui nous permettra d'agir efficacement. Ce savoir est transdisciplinaire, et il a vocation à être enrichi, approfondi, confronté à la pratique et décliné dans tous les métiers.

Pour partager cette intelligence et agir pour éviter le pire et donner toutes ses chances au meilleur, nous avons créé 2050. Sur chaque sujet essentiel à la vie humaine, de l'agro-alimentaire aux services assurantiels, nous déployons une stratégie d'investissement visant à

régénérer la fertilité de nos économies. Nous finançons des écosystèmes d'entreprises alignant leur intérêt économique avec celui de la société et de la planète, nourris par des communs stratégiques qui leur permettent de se développer en puissance et en résilience.

Ce livre en est la première brique, notre premier commun stratégique. Ses auteurs, Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, l'ont mis sous licence libre afin que vous puissiez vous approprier pleinement ce savoir, l'augmenter, le transmettre à votre tour. Il s'agit d'une première dans le monde académique: qu'ils en soient ici remerciés.

Enfin, ce livre est aussi une collaboration inter-générationnelle fructueuse, porteuse d'espoir et d'ouverture, et une transmission familiale. Mon père est le premier à m'avoir éveillée au réchauffement climatique et à la perte de biodiversité ainsi qu'à leurs conséquences, après son séjour à Vancouver dans les années 2000.

Ses coopérations scientifiques lui avaient fait toucher du doigt la réalité de l'extinction progressive des poissons dans les océans à cause de la surpêche. Idem pour la disparition des arbres dans les forêts de Colombie Britannique, nécrosés année après année par un scarabée parasite qui ne mourrait plus l'hiver. Il avait également étudié les conséquences de ces phénomènes sur l'économie locale et la société canadienne, comprenant leur importance et leur inertie.

Je suis heureuse qu'il ait effectué ce formidable travail transdisciplinaire d'exploration, de compréhension et de synthèse de l'état de l'art scientifique, et qu'Aïcha l'ait épaulé pour en faire un savoir transmis sous forme de culture générale. Et je me réjouis que nous puissions vous en faire profiter à votre tour.

2050 démarre aujourd'hui, j'espère avec vous.





Ivar Ekeland

Faut-il avoir peur du réchauffement climatique ? Et de la perte de biodiversité ? Et de l'imprégnation chimique des sols ? Et de toutes ces menaces que couve le 21ème siècle, dont on sent vaguement qu'elles sont liées, et qui sont d'autant plus redoutables qu'on les connaît moins ?

Devant l'incertitude, l'ignorance crée la peur, et la peur paralyse. Je vais prendre une analogie maritime. Quand on part en voiture, on peut planifier son voyage jusqu'au dernier détail : le premier soir je coucherai là, le troisième jour je déjeunerai ici, et j'arriverai à destination tel jour à telle heure. Mais quand on part en croisière c'est une autre affaire : la route dépend du temps qu'il fera, ainsi que de la mer, et on ne peut pas les prévoir longtemps à l'avance. Quelles que soient les précautions prises, on peut rencontrer du mauvais temps, voire du très mauvais temps, et il peut tomber sur vous très vite. Mieux vaut alors être préparé, avoir vu venir le grain, avoir pris des ris, avoir changé la course du bateau et savoir manoeuvrer à la lame. Ce qui est un danger pour l'un est une opportunité pour l'autre.

Oui, il faut avoir peur de la mer si on n'y connaît rien. Mais si on a appris, il ne faut plus en avoir peur, il faut juste savoir qu'elle a ses lois, et qu'il faut les respecter. Le réchauffement climatique, c'est pareil. Il peut se passer beaucoup de choses d'ici 2100, et on ne sait pas où il va nous mener. Mais il a ses lois, et il vaut mieux les connaître si l'on veut être capable d'affronter la traversée. Il y a des lois physiques, comme

l'effet de serre, il y a des lois historiques, comme l'effet rebond, dit aussi effet Jevons, il y a des lois biologiques, comme les grands cycles naturels, et il faut les comprendre si on veut agir efficacement.

Le but de ce cours est de donner le bagage minimal permettant de comprendre le réchauffement climatique. Il est volontairement réduit: nous n'avons pas cherché à approfondir les choses (pour ceux qui le souhaitent, il y a une abondante documentation en ligne), nous avons plutôt cherché à montrer l'unité profonde du phénomène. Pour mettre en place une taxe carbone, par exemple, il faut à la fois comprendre comment les émissions de CO2 contribuent à l'effet de serre, ce qui relève de la physique, et pourquoi une telle taxe sera mal acceptée si elle n'est pas perçue comme juste, ce qui relève de l'éthique et du droit.

Ah, une dernière chose : on est libre de partir en croisière ou non, on peut même choisir sa date de départ. Pour le réchauffement climatique, on n'a pas le choix : nous sommes tous embarqués, et le bateau est parti. Il est même parti très vite : la concentration de CO2 dans l'atmosphère est passée de 313 ppm en 1958 à 415 ppm aujourd'hui, en décembre 2020.





Aicha Ben Dhia

Conaissez-vous la fable de l'éléphant? Dans une pièce se trouve un grand éléphant (c'est une grande pièce!). On y fait entrer dix explorateurs courageux auxquels on a bandé les yeux. Ceux-ci n'ont jamais entendu parler d'éléphant auparavant. Ils s'approchent de l'animal à tâtons et le découvrent du bout des doigts. À leur sortie de la pièce, on les interroge: qu'est-ce qu'un éléphant? À quoi cela ressemble? «C'est vertical, cylindrique massif, et ça ne bouge pas», répond une première exploratrice en mimant des mains. Un second réagit: «Au contraire! C'est courbe, lisse et froid.» Le troisième s'énerve: «Ni lisse, ni froid, c'est plein de poils et ça vole au vent!» La quatrième quitte la pièce en claquant la porte parce que personne n'a même pensé à écouter attentivement les bruits que faisait l'éléphant.

Qu'est-ce que le réchauffement climatique? À quoi cela ressemble? À un glacier qui fond, une éolienne off-shore ou un gilet jaune sur un rond-point? Le livre que vous tenez entre vos mains aimerait être le onzième personnage de la fable: expert de rien mais ouvrant ses oreilles à tout pour réussir à comprendre les bouleversements environnementaux que nous vivons et en construire un dessin cohérent. Organisé en plusieurs tomes dont voici le premier, il est motivé par l'idée qu'on ne comprend vraiment un problème qu'en croisant les angles de vue; que ces enjeux doivent être accessibles à tous, scientifique ou non, économiste ou pas, plutôt que de subir un flux d'information angoissant et désorganisé; que comprendre, c'est déjà agir.

Ce premier tome pose le socle et présente les mécanismes naturels qui régulent le climat. On y verra que le climat a toujours changé, au rythme géologique de centaines de milliers d'années, et que les êtres vivants n'en sont pas des spectateurs mais des acteurs interconnectés. Depuis deux cents ans, ce régime est bouleversé et nous allons voir quelles trajectoires futures se dessinent devant nous.

Comment les sociétés se sont-elles saisies de la puissance des énergies fossiles, métamorphosant leur rapport au monde et leurs organisations économiques et sociales? Ce sera l'objet du second tome.

Nous avons rassemblé ce savoir à l'occasion du lancement d'un cours pluridisciplinaire sur les enjeux écologiques du XXI^e siècle à l'université Paris-Dauphine. Une première dans l'enseignement supérieur — et pas seulement en France! — à destination de tous les étudiantes et étudiants de licence, qu'ils ou elles se destinent au marketing, à la finance ou à l'entrepreneuriat social.

Car toutes nos vies professionnelles — et personnelles — se jouent dorénavant au milieu des tourbillons écologiques que ce livre raconte. Plutôt qu'un tsunami terrifiant, j'espère que ces tourbillons prendront au gré de votre lecture la forme d'une grande vague peinte par Hokusai: immense et belle. Et que cela contribuera à vous inspirer cette posture subtile d'équilibriste entre humilité contemplative et audace joyeuse qu'il nous faut pour surfer dessus!

15 **1**
**Le climat sur Terre a toujours varié,
mais jamais aussi vite qu'aujourd'hui!**

- 18 1 — Le mouvement autour du soleil
et le cycle des saisons
24 3 — L'eau
26 4 — Le climat
27 5 — Les changements climatiques
au cours de l'histoire de la Terre

35 **2**
**L'effet de serre est un effet sac de couchage
et le sac se rembourre depuis deux siècles**

- 38 1 — L'effet de serre
45 2 — Les gaz à effet de serre (GES)
47 3 — Le forçage radiatif

53 **3**
**Les êtres vivants sont tous interconnectés: c'est la
biosphère et elle contribue directement au climat
terrestre**

- 56 1 — La biosphère
61 2 — La complexité du vivant
64 3 — La fragilité du vivant
67 4 — D'où viennent l'oxygène et l'énergie
dont les vivants ont besoin?

73 **4**
**Sur Terre et dans l'atmosphère, le carbone
circule en permanence. Que se passe-t-il quand
les activités humaines modifient les flux vers
l'atmosphère?**

- 76 1 — Plantes et planctons dans la photosynthèse
79 2 — Cycle du CO₂
83 3 — Hors de l'équilibre
88 4 — Durée de vie dans l'atmosphère
93 5 — Et la vapeur d'eau dans tout ça?

97 **5**
**Observations, expérimentations et interprétations
convergent: démarche scientifique
et climatoscpticisme ne vont pas bien ensemble**

- 100 1 — Il se passe quelque chose
109 2 — Et du côté des vivants?
116 3 — Le lien avec le CO₂
121 4 — Le lien avec les activités humaines

125 **6**
**Et maintenant, où allons-nous?
Comprendre les scénarios du GIEC**

- 126 Introduction
128 1 — Comment fait-on les prévisions?
140 2 — Qu'est-ce que le GIEC?
143 3 — Comment lire les rapports du GIEC?



Ce cours est un commun

Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, co-auteur.e.s, ont souhaité faire de cette leçon un bien commun en le plaçant sous licence libre Creative Commons CC-BY-SA 4.0. Cela signifie que vous pouvez réutiliser, distribuer, citer, modifier et adapter les contenus de cette leçon comme bon vous semble, y compris à des fins commerciales, tant que :

- 1 — Vous l'attribuez de la manière suivante: "Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, avec le soutien de l'Université Paris-Dauphine, la Fondation Madeleine et la société 2050";
- 2 — Le contenu que vous créez sur la base de celui-ci est placé sous une licence similaire, c'est-à-dire qu'il n'interdit à personne de réutiliser vos améliorations.

Pour plus de détails, nous vous invitons à consulter la licence complète: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fr>

Cette licence ne concerne toutefois pas les illustrations en couverture de chaque leçon ou les travaux référencés, qui demeurent placés sous leur mention légale d'origine.





1

**Le climat sur Terre
a toujours varié,
mais jamais aussi vite
qu'aujourd'hui!**



Introduction

«Il y a eu deux découvertes fondamentales en science physique. La première, c'est que la Terre est ronde, la deuxième c'est qu'elle tourne autour du Soleil. On sait que la Terre est ronde depuis l'Antiquité, mais il a fallu attendre le XVI^e siècle pour savoir qu'elle tourne autour du Soleil. Une fois qu'on a compris ces deux mouvements, on a pu en déduire beaucoup de choses.

On a pu, par exemple, expliquer l'alternance des saisons, des étés chauds aux hivers froids, à cause de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à son plan de rotation, qui fait qu'on ne reçoit pas les rayons du soleil avec le même angle suivant qu'on est d'un côté ou de l'autre de l'orbite.

Mais on peut aussi expliquer bien d'autres choses encore, comme le régime des vents, indispensable pour naviguer, pour prévoir la météo du jour et pour comprendre... les variations du climat qui nous attendent!

Car le climat change. Si l'on remonte très loin dans l'histoire de la Terre, on sait qu'il a énormément changé. Pour vous donner une idée de l'ampleur de ces changements, il y a 120 000 ans, à 5 degrés de moins en moyenne sur la planète, New York était sous la banquise. Le climat changera aussi certainement dans le futur lointain. Ces changements sont liés à des modifications de l'orbite terrestre. Alors, pourquoi s'inquiéter si le climat change en ce moment?

C'est qu'il change très vite, beaucoup trop vite. Jusqu'à présent, les changements étaient graduels, car ils suivaient les modifications très lentes de l'orbite terrestre. Ces modifications prennent des dizaines de milliers d'années. Cela laissait aux êtres vivants le temps de s'adapter. Mais les changements que nous observons aujourd'hui sont concen-

trés sur quelques dizaines d'années, et les conséquences sont très différentes. C'est un peu comme si vous étiez dans une voiture qui roule à 100 km/h et qui doit s'arrêter: est-ce que vous allez vivre la même expérience si on vous donne 1000 mètres pour freiner, ou 1 mètre? Dans le premier cas c'est un freinage, dans le second c'est un crash.»

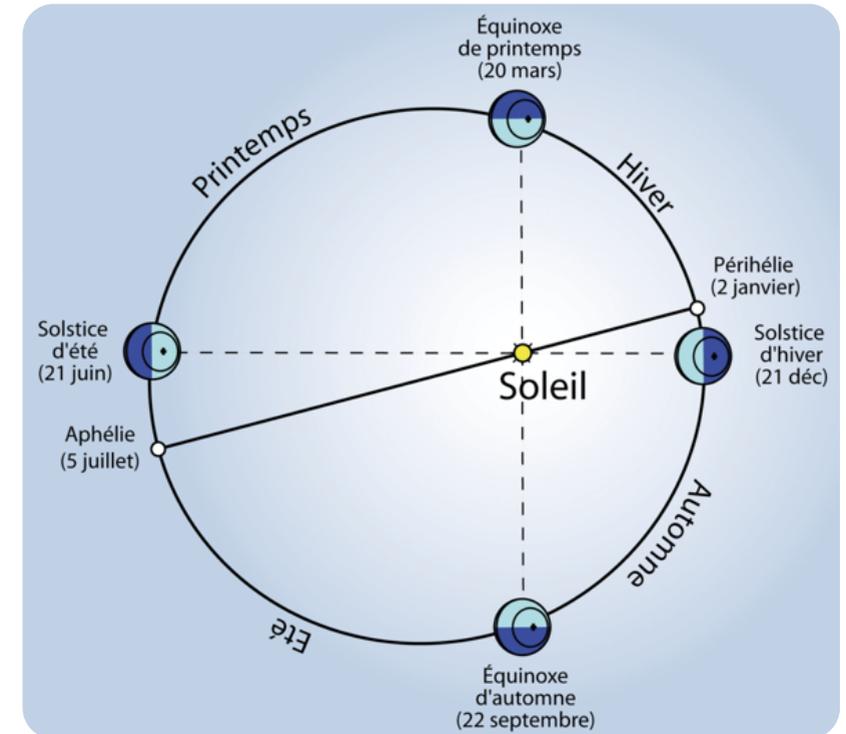


1

Le mouvement autour du soleil et le cycle des saisons

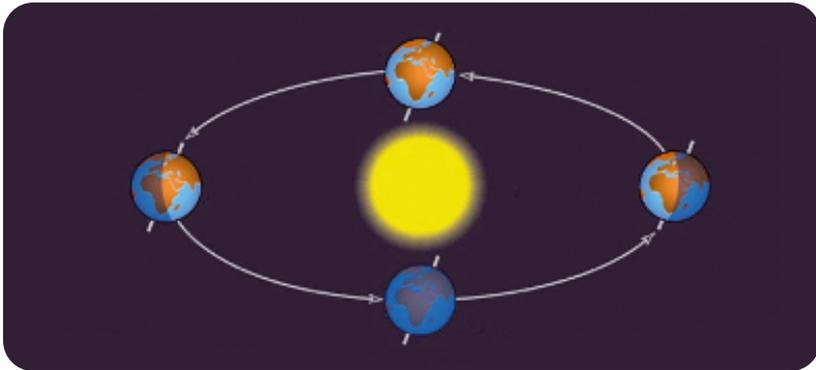
1.1. Les deux rotations de la Terre

La Terre est animée par deux mouvements principaux. D'une part, elle tourne autour du Soleil. Sa trajectoire est plane (pas comme un papillon de nuit qui tourne autour d'une ampoule en montant et descendant sans cesse, mais comme un patineur sur glace qui reste sur un même plan horizontal). Au XVI^e siècle, Kepler (1571-1630) découvre que cette trajectoire n'est pas exactement un cercle mais une ellipse, ce qui veut dire qu'il y a un point qui est le plus proche du Soleil, et un point qui est le plus éloigné. Le temps que la Terre met à parcourir l'ellipse est l'année. D'autre part, la Terre tourne sur elle-même. L'axe de cette rotation passe par les pôles. Le temps qu'elle met à effectuer une rotation complète est la journée. Chacun de ces mouvements est simple. Si on considère leur combinaison, cela commence déjà à se complexifier.



Rotation de la Terre autour du Soleil et alternance des saisons dans l'hémisphère Nord.

Source : www.soutien.profexpress.com

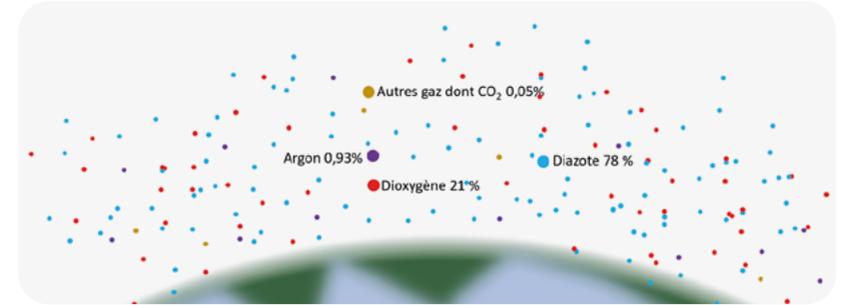


Variation de l'exposition au Soleil dans les hémisphères due à l'inclinaison de l'axe

Pourquoi avons-nous des saisons? Parce que l'axe de rotation de la Terre n'est pas vertical. Il garde toujours la même direction dans l'espace, et cette direction fait un angle d'environ 23° avec la verticale. De ce fait, pendant la moitié de l'année, un des hémisphères sera penché vers le Soleil, et durant l'autre moitié, ce sera l'autre. Les saisons sont certainement l'exemple qui nous est le plus familier de la dépendance du climat aux mouvements astronomiques.

1.2. L'Atmosphère

Il faut introduire un dernier facteur-clé pour comprendre le climat: **l'atmosphère**. L'atmosphère est une **couette gazeuse** qui entoure la Terre, constituée à 78% de molécules de diazote, à 21% de dioxygène, 0,93% d'argon, et moins de 0,05% d'autres gaz comme le dioxyde de carbone (le fameux CO_2). Beaucoup de planètes du système solaire ont des atmosphères. Mais leurs compositions sont très différentes de celle de la Terre. Par exemple, l'atmosphère de Mars contient principalement des molécules de dioxyde de carbone et presque pas du tout de dioxygène. Celle de Vénus est surtout faite de dioxyde de carbone. Sur l'une comme sur l'autre, impossible aux animaux terrestres de respirer.



Résumé

Atmosphère, rotation de la Terre autour du Soleil, et rotation inclinée de la Terre sur elle-même: voilà les facteurs astronomiques qui déterminent le climat terrestre.

2. Le brassage de l'atmosphère par les vents

Si vous demandez la météo de demain à Paris, quelles informations souhaitez-vous obtenir exactement? **La température** au sol bien sûr. C'est le premier élément de la météo. Quel est le second? **Le vent**. Qu'est-ce que le vent? Rien d'autre que les molécules en suspension dont nous venons de parler (diazote, dioxygène...) qui se déplacent ensemble dans l'atmosphère.

Mais est-ce que cela dépend vraiment des mouvements astronomiques? La réponse est oui. Si l'on monte dans un satellite et qu'on observe les grands déplacements d'air à l'échelle planétaire pendant une année, on va s'apercevoir qu'il y a une **grande régularité** et que ces déplacements peuvent être expliqués par les mouvements astronomiques de la Terre.

D'ailleurs, vous aussi connaissez certainement des mouvements d'air réguliers et prédictibles. Dans un sauna par exemple, est-ce que l'air chaud monte ou est-ce qu'il descend? Il monte! Et que se passe-t-il lorsque vous faites bouillir de l'eau liquide dans une casserole? Les



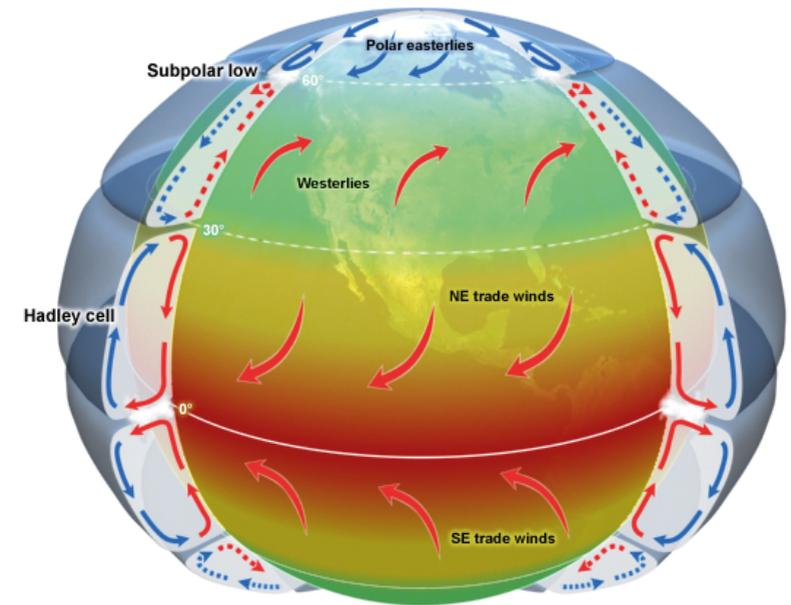
molécules se désolidarisent les unes des autres et l'eau liquide se transforme en eau gazeuse, aussi appelée vapeur d'eau. Dans quelle direction vont ces molécules d'eau sous forme gazeuse? Vers le haut! Car dans un gaz, ce qui est chaud monte et ce qui est froid descend.

Voici un dernier exemple pour illustrer l'importance de la rotation de la Terre sur le sens des vents: si vous tenez votre casserole bouillante sur le bord d'un manège qui tourne vite, est-ce que la vapeur d'eau qui se dégage en hauteur va vous chauffer les yeux ou bien viendra-t-elle se déposer sur le visage de votre voisin de derrière? À cause du manège qui tourne, elle va atterrir sur la personne derrière vous dans le manège.

Ce genre de **règles mécaniques** s'applique aussi à l'échelle planétaire (les courants d'air chaud montent, ils sont déviés vers l'Ouest car la Terre tourne comme un manège d'Est en Ouest, etc.). Cela explique pourquoi les vents soufflent régulièrement d'un point à l'autre du globe. La figure ci-dessous donne une représentation schématique du régime des vents sur la Terre, avec les flux chauds en rouges et les flux froids en bleus. L'essentiel ici n'est pas de connaître chacun des mouvements mais de comprendre que ces mouvements d'air sont aussi prédictibles et réguliers que l'air chaud qui monte dans un sauna.

Arrêtons-nous un instant pour noter un second point capital. Cette figure montre que l'atmosphère terrestre est **brassée en permanence**. Cela veut dire que si l'on envoie une molécule persistante en suspension dans l'atmosphère, elle restera peut-être en suspension mais ne restera pas sur place. Elle sera déplacée d'un point à l'autre du globe au gré des vents.

Ainsi si une entreprise émet du CO₂, le gaz émis ne stagne pas au-dessus d'elle. Si tel était le cas, elle en souffrirait elle-même (et prendrait sans doute bien vite les mesures nécessaires pour y remédier). C'est parce que le gaz est dispersé qu'elle peut le négliger et le laisser se répandre sur la planète. Faute d'être réglé localement, la pollution devient alors un **problème global**.



Orientation des vents atmosphériques.

Source: The COMET Program

Résumé

- ♦ Les vents terrestres sont régis par les mouvements astronomiques de la Terre. Ils suivent des déplacements prédictibles et réguliers.
- ♦ L'atmosphère est brassée en permanence: toute molécule qui se maintient en suspension voyage d'un point à l'autre du globe.

3

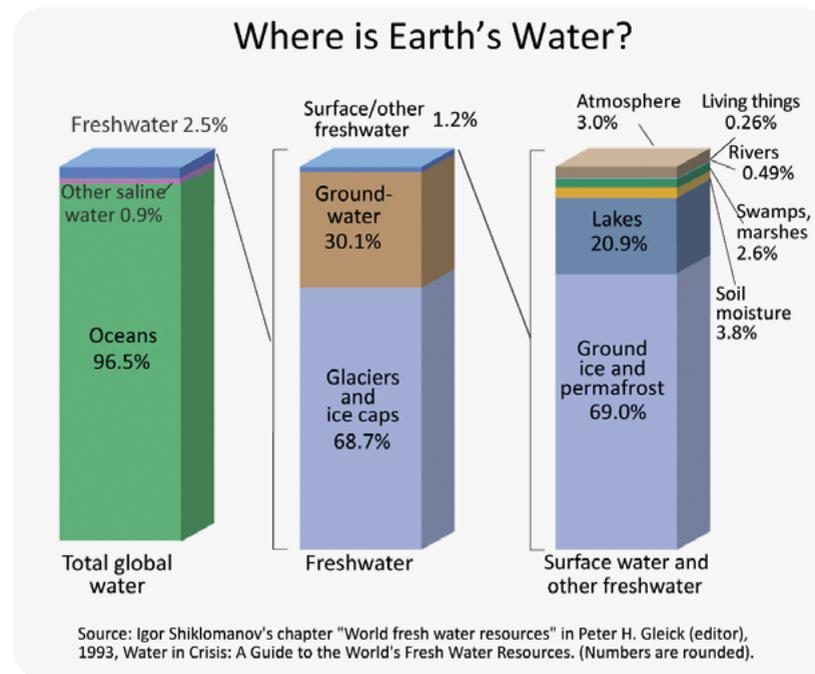
L'eau

Température au sol, force et direction des vents. Que manque-t-il à ce bulletin météo pour savoir si vous devez organiser un pique-nique ou une sortie au cinéma? L'eau bien sûr!

L'eau, c'est-à-dire: les nuages, la pluie, la neige, la grêle, la glace. La planète Terre est la seule du système solaire où les températures sont assez clémentes pour que l'on y trouve l'eau sous ses trois formes: solide, liquide, gazeuse. L'immense majorité de l'eau sur Terre se trouve sous forme liquide, dans l'océan (97%), dans les rivières, dans la végétation et le sol. Elle se trouve ensuite sous forme solide, dans les calottes glaciaires (2%) c'est-à-dire essentiellement la banquise.

Il y en a moins de 0,001% sous forme gazeuse: c'est la **vapeur d'eau** de l'atmosphère.

C'est une proportion infime de l'eau présente sur la Terre, mais elle joue pourtant un rôle capital, comme nous le verrons plus tard. Pour l'instant, contentons-nous de constater qu'elle est extrêmement visible, sous forme de nuages ou de précipitations, et que l'humidité est, avec la température et les vents, la troisième donnée essentielle de la météorologie.



Lecture: 96,5% des molécules d'eau présentes sur Terre se trouve sous forme liquide dans les océans. L'eau douce ne représente que 2,5%, dont les deux tiers (68,5%) sont dans les glaciers et les calottes glaciaires. Il n'y a qu'une infime portion de l'eau (2,5% x 1,2% x 3%) qui se trouve sous forme de vapeur dans l'atmosphère.

Source: Igor Shiklomanov dans "Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources.", Peter H. Gleick



4 | Le climat

Température, humidité, vent en un point donné à un instant donné : voilà les trois composantes de la **météo**.

Ces composantes varient d'instant en instant et de place en place. Mais si vous enregistrez ces variations sur plusieurs journées, et cela pendant des mois, vous verrez qu'elles suivent des **cycles périodiques**. La plupart de ces cycles nous sont devenus très familiers (on sait tous que dans l'hémisphère Nord, il fait quasiment toujours plus chaud en juillet qu'en mars, et en mars qu'en décembre ; ou bien encore qu'il pleuve plus en novembre qu'en juin).

C'est pourquoi on peut faire des moyennes sur plusieurs années et parler du **«climat»** d'un endroit donné sans spécifier une année en particulier. Ces **moyennes** sont en général prises sur trente ans, et dépendent de l'endroit où l'on se place.

Ce sont ces moyennes de températures, vents et précipitations qui constituent le «climat».

Résumé

- ♦ Une très faible proportion de l'eau sur terre est sous forme gazeuse, en suspension dans l'atmosphère (nuage, humidité, brouillard), mais elle joue localement un rôle important sur le climat.
- ♦ Le climat en un point est la donnée moyenne de la température, des vents et des conditions d'humidité en ce point. Les moyennes sont généralement faites sur trente années d'observation.

5 | Les changements climatiques au cours de l'histoire de la Terre

1.3. Le climat change. Comment le sait-on ?

Logiquement, si les facteurs astronomiques, comme l'orbite terrestre ou l'inclinaison de l'axe, changent, le climat changera. A l'heure actuelle, l'orbite terrestre est une ellipse presque circulaire avec une inclinaison de l'axe de rotation de 23 degrés par rapport à la verticale. Si par exemple l'axe s'écarte davantage de la verticale, les jours d'été rallongeront et les jours d'hiver raccourciront car les saisons seront encore plus marquées dans les deux hémisphères.

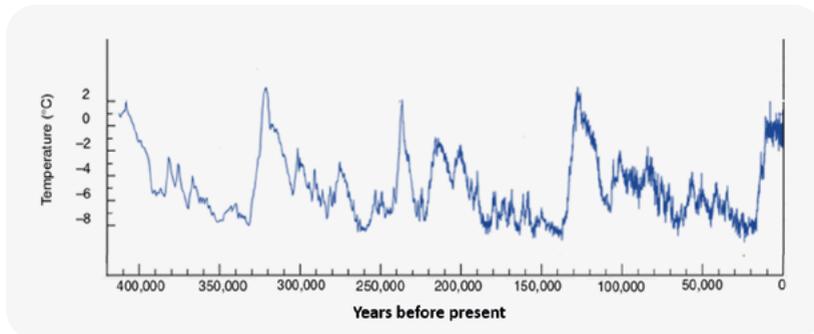
Effectivement, tous ces facteurs changent, suivant des cycles réguliers : de l'ordre de 400 000 ans pour l'orbite, de 40 000 pour l'inclinaison, et de 26 000 pour les solstices. Naturellement, le climat change avec. Comment le prouve-t-on ? Comment arrive-t-on à remonter le temps et reconstituer les climats passés ?

Il reste des traces des changements climatiques passés dans les fossiles, les pollens par exemple, qui permettent de reconstituer la végétation. Mais la grande avancée est due aux **forages polaires**. L'idée de base est que la composition de la neige et de la glace dépend de la température et de l'insolation au moment où elles se sont formées. En outre, elles emprisonnent des bulles d'air qui témoignent de la composition de l'atmosphère à cette époque. On dispose donc d'archives qui permettent de mettre en parallèle la température et la teneur en

dioxyde de carbone (CO₂) et en méthane (CH₄). Les premiers carottages, en Arctique, ont permis de remonter 80 000 ans en arrière, et les carottages réalisés en Antarctique nous permettent de remonter dix fois plus loin !

1.4. Relation entre température et gaz à effet de serre

Le graphique ci-dessous est une reproduction de la courbe de température mesurée dans la glace sous la base russe de Vostok en Antarctique (tirée de l'article scientifique Petit et al. (1999)¹). La courbe ne donne pas directement une température absolue, elle donne les écarts de température par rapport à une température de référence de -55°C. Les températures relevées varient donc entre -53°C et -64°C environ. Mais ce qui frappe en regardant la figure, c'est la **régularité des variations**, avec un pic tous les 100 000 ans environ.



Évolution de la température au-dessous de la station de Vostok.

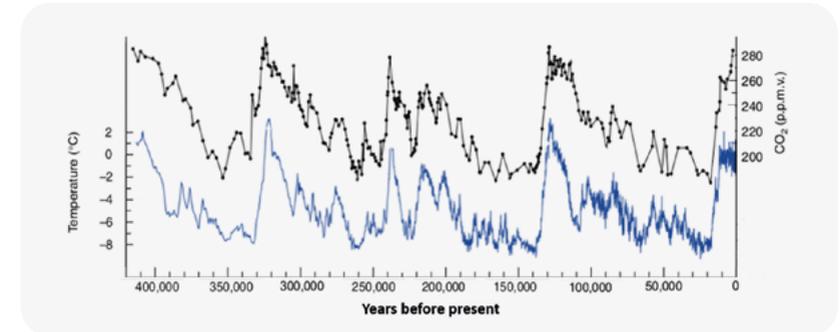
Source: www.climatedata.info

Cette **vitesse très lente** correspond bien aux variations des paramètres astronomiques. La chute quasiment verticale qu'on observe tous les cent mille ans ou à peu près (et qui correspond à des chutes de température de 10°C environ) s'effectue quand même sur 10 000 ans !

On peut ensuite y superposer la courbe de **concentration de CO₂** en noir. Comme on l'a vu dans la partie précédente, l'air de l'atmosphère

contient très peu de molécules de CO₂, de l'ordre de 0,05%. Pour exprimer la teneur de l'air en CO₂, on n'utilise donc pas les pourcentages mais les **«pour-millions»**, c'est-à-dire qu'on indique le nombre de molécules de CO₂ par million de molécules d'air. Cela se dit «partie-par-million» et correspond à la notation **«ppm»**.

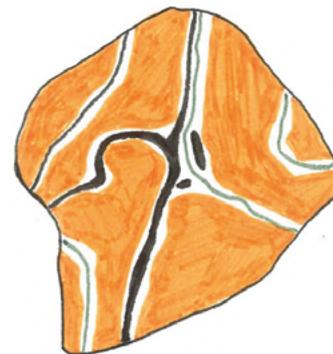
Le parallélisme des deux courbes est frappant.

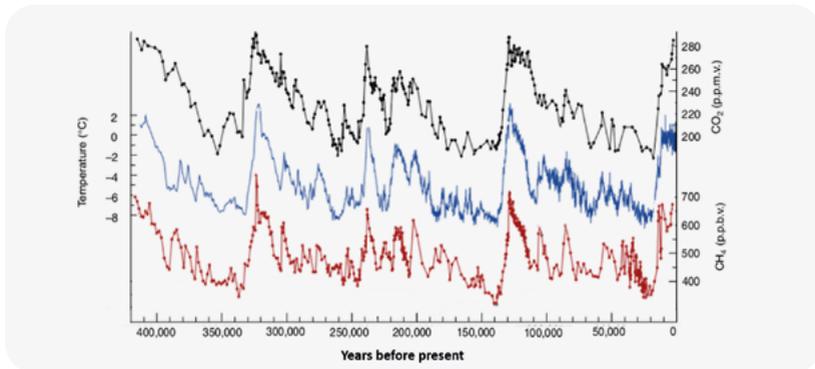


Évolution conjointe de la température et de la concentration de CO₂ dans l'air.

Source: www.climatedata.info

Ajoutons enfin la courbe du méthane CH₄ en rouge. Il y a encore moins de particules de CH₄ que de CO₂ dans l'atmosphère. On exprime donc la teneur de l'air en CH₄ en «parties-pour-milliards», en anglais «part-per-billion». Cela correspond à la notation «ppb». Là encore, la corrélation avec les deux autres courbes est très visible.





Évolution conjointe de la température et des concentrations du CO₂ et du CH₄ dans l'air.

Source: www.climatedata.info

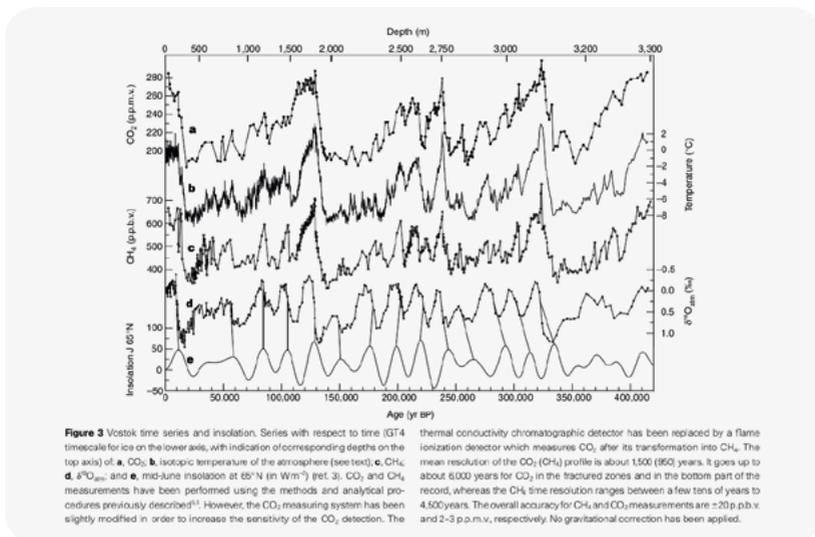


Figure 3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (GT4 timescale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the top axis) of **a.** CO₂, **b.** isotopic temperature of the atmosphere (see text), **c.** CH₄, **d.** $\delta^{18}O_{atm}$ and **e.** mid-June insolation at 65°N (in W m⁻²) (ret. J). CO₂ and CH₄ measurements have been performed using the methods and analytical procedures previously described¹¹. However, the CO₂ measuring system has been slightly modified in order to increase the sensitivity of the CO₂ detection. The thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO₂ after its transformation into CH₄. The mean resolution of the CO₂ (CH₄) profile is about 1500 (950) years. It goes up to about 8000 years for CO₂ in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH₄ time resolution ranges between a few tens of years to 4,500 years. The overall accuracy for CH₄ and CO₂ measurements are ±20 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

Évolution temporelle des paramètres climatiques au-dessous de la station de Vostok.

Petit, J., Jouzel, J., Raynaud, D. et al., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436 (1999). <https://doi.org/10.1038/20859>

Voilà le graphique issu de l'article scientifique d'origine. La **corrélation** entre la teneur de l'atmosphère en CO₂ et en CH₄ (méthane) et la température est évidente. Est-ce que cela implique que la teneur en CO₂ et en CH₄ soit la cause des variations de température? Sans informations supplémentaires, la réponse rigoureuse à cette question est « pas nécessairement ». A priori cela pourrait être l'inverse (une température plus chaude pourrait accroître les quantités de gaz carbonique et de méthane dans l'air) ou peut-être qu'un autre facteur inconnu influence tous ces paramètres conjointement. Mais à ce stade de l'enquête, une chose est sûre: les périodes où l'atmosphère contient de CO₂ et de CH₄ sont aussi les périodes où il fait le plus chaud.

1.5. Les changements climatiques récents

Terminons cette leçon en revenant à l'image de la voiture et du crash. Quand on voit ces variations, on se dit que la Terre en a vu d'autres! Peut-être, après tout, n'y a-t-il pas de raison de s'inquiéter si nous traversons à nouveau une zone de turbulence climatique.

La Terre, oui, mais l'humain? Sur ce long axe du temps, qui n'est encore pas grand-chose à l'échelle de l'âge de la planète Terre, on peut dire approximativement que l'espèce humaine est apparue il y a 10 000 ans. En zoomant sur ces 10 000 dernières années, on observe une **stabilité exceptionnelle** de la température à des valeurs relativement hautes, entre -56°C et -54°C. Cette stabilité a profité aux êtres humains et à leur écosystème pour s'adapter, se maintenir et se développer.



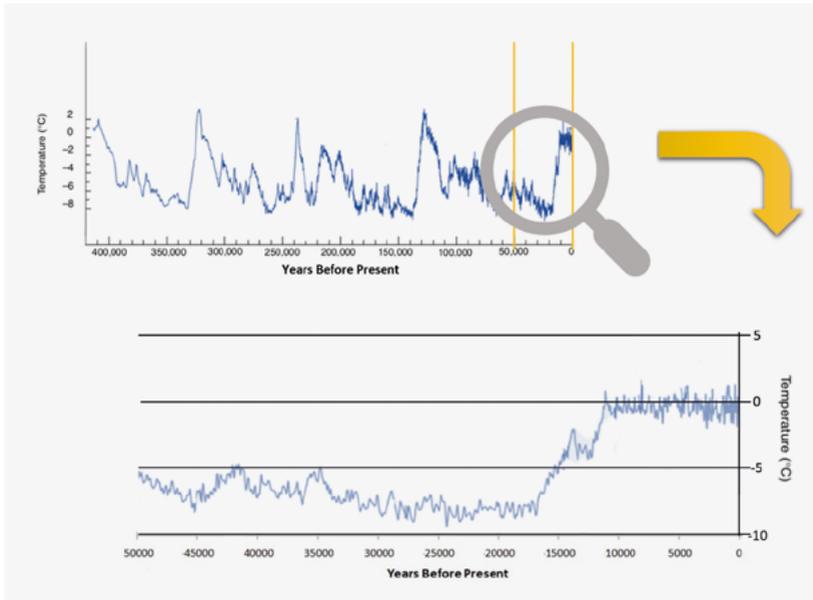
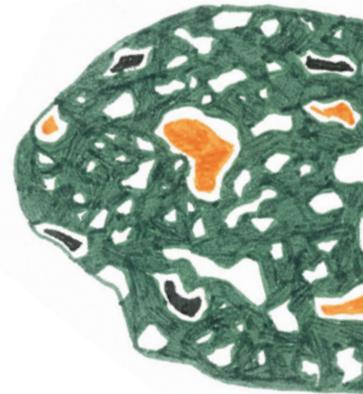


Conclusion

Les personnages sont en scène: la Terre et son atmosphère, les vents et les molécules en suspension qu'ils transportent, diazote, dioxygène et en infime proportion, gaz carbonique, vapeur d'eau, méthane...

Puis le script: variations régulières et parallèles des personnages centraux – température, gaz carbonique, méthane – suivant dans l'ensemble les modifications de la trajectoire de la Terre dans le système Solaire. Un script vieux de 500 000 ans et que l'on sait déchiffrer en plongeant dans les glaces millénaires de l'Antarctique. Cela laisse rêveur.

Mais la pièce prend depuis deux siècles un nouveau tour. Car les variations climatiques observées depuis la Révolution Industrielle n'ont rien des légères fluctuations observées pendant les 10 000 ans de stabilité de l'Holocène. Ces variations sont du même ordre que les grands cycles astronomiques... mais sur une échelle de temps mille fois plus rapide.



Zoom sur l'évolution de la température sur les 50 000 dernières années.

Source: www.climatedata.info

Résumé

- ♦ On connaît les températures et la composition de l'atmosphère passées en effectuant des carottages dans la banquise et les lacs gelés de Sibérie.
- ♦ La température sur Terre a varié de façon cyclique, au gré des variations des facteurs astronomiques, sur des échelles temps de l'ordre de la dizaine de milliers d'années.
- ♦ Les variations de température et les teneurs de l'atmosphère en CO_2 sont très fortement corrélées, ce qui suggère qu'elles sont liées.
- ♦ La période de l'Holocène est caractérisée par une remarquable stabilité de températures hautes qui a profité à l'espèce humaine et à celles qui l'entourent.





2

L'effet de serre
est un effet sac
de couchage et le sac
se rembourre depuis
deux siècles



Introduction

«Lorsque vous partez camper, n'oubliez pas votre sac de couchage. Si vous n'en avez pas, vous aurez trop froid pour dormir. La chaleur de votre corps va diffuser autour de vous: au mieux elle réchauffera la tente si vous en avez une, mais pour vous elle sera perdue. Si vous en avez un, il vous renverra une grande partie de la chaleur que vous émettez, et c'est comme cela que vous aurez chaud.

Notre planète aussi a un sac de couchage: c'est son atmosphère. Elle absorbe une partie de la chaleur émise par la Terre et la lui renvoie. On appelle cela traditionnellement l'effet de serre, mais on ferait mieux de l'appeler «effet sac de couchage» ou «effet couette».

La comparaison va plus loin encore. Vous savez que les sacs de couchage sont plus ou moins chauds suivant leur épaisseur et la qualité de ce qui est à l'intérieur: les sacs les plus chauds et les plus chers sont rembourrés en plumes de canard.

Ce qui remplace les plumes de canard, dans le cas de l'atmosphère, ce sont certaines molécules qui retiennent très bien la chaleur. Ce sont ces gaz qu'on appelle gaz à effet de serre: ceux que vous connaissez (le gaz carbonique, le méthane...) et un autre auquel vous ne pensez peut-être pas: la vapeur d'eau.

Plus il y en a, plus l'atmosphère est chaude. Rajouter des gaz à effet de serre dans l'air, c'est comme rajouter des plumes de canard dans le sac: cela réchauffe la Terre. Le problème, c'est qu'on peut facilement retirer les plumes d'un sac de couchage, mais qu'on ne sait pas retirer facilement le gaz carbonique de l'atmosphère. S'il fait déjà trop chaud aujourd'hui, il fera encore plus chaud demain.»



1

L'effet de serre

1.1 Le rayonnement des corps chauds

La surface du Soleil est à une température de l'ordre de 5700 degrés Celsius. C'est une température considérable! Cette température est directement liée à la lumière que le Soleil nous renvoie. C'est même exactement parce qu'il chauffe que le Soleil nous envoie des rayons lumineux. Plus étonnant encore: ce principe est vrai pour tout objet. Tout objet (votre montre, votre orteil, un brin d'herbe) émet du rayonnement lumineux, et ce rayonnement dépend directement de sa température.

Vous répondrez peut-être que quand la bouilloire chauffe, elle n'illumine pas la cuisine. D'un autre côté, vous connaissez les lunettes infra-rouges qui permettent de détecter des corps humains dans le noir dans les films d'espionnage parce qu'ils sont plus chauds que le reste des objets dans la pièce (ou plus récemment de mesurer à distance les températures anormalement élevées en prévention du covid-19). Eh bien, si vous chaussez vos lunettes infrarouges en vous faisant un thé, vous verrez aussi votre bouilloire dans le noir!

Pourquoi? Il serait compliqué d'entrer dans le détail de cette loi fondamentale de la physique moderne et nous allons nous contenter d'en illustrer les principes essentiels.

1. Chauffer un objet de matière (un morceau de bois, votre main ou de la vapeur d'eau) revient à créer de **l'agitation des atomes et molécules** qui le composent. Cela doit vous rappeler le chapitre précédent et la formation de la vapeur d'eau. Avant même d'atteindre 100 degrés Celsius, le fait de chauffer de l'eau liquide crée de l'agitation à l'intérieur de la casserole. C'est aussi pour cela qu'il faut mettre de l'eau chaude

si l'on veut infuser du thé: leur agitation permet à toutes les molécules d'eau d'imbiber rapidement les feuilles de thé et de diffuser leur parfum dans la tasse.

2. Plus mystérieux: lorsqu'un atome (ou une molécule) s'agite, il peut se décharger de son énergie en envoyant des **ondes lumineuses**. La surface du Soleil est à une température très élevée. Elle est donc composée d'atomes très agités, et ces atomes ne demandent qu'à se décharger d'une partie de leur énergie en renvoyant de la lumière partout dans le système solaire.¹

3. Alors pourquoi votre bouilloire n'est pas une boule à facettes dans votre cuisine? Cela tient à la **forme des ondes** qu'elle envoie et à la **sensibilité de nos yeux**. En effet, une onde lumineuse, comme les vagues sur la mer, peut avoir plusieurs formes: certaines ondes sont très étalées (les «sommets» de chaque vague sont très espacés), d'autres sont très compactes. On dit qu'une onde peut avoir une grande longueur d'onde (sommets très espacés) ou une petite **longueur d'onde** (sommets très rapprochés). S'agissant des ondes lumineuses, il n'y a pas de relation entre la vitesse de l'onde et sa longueur d'onde (c'est d'ailleurs vrai aussi pour les ondes acoustiques et c'est pour cela que toutes les notes d'un accord, malgré leurs différentes longueurs d'onde, atteignent votre oreille au même moment).²

Plus un objet a une **température élevée**, plus il rayonne des ondes lumineuses compactes, c'est-à-dire à courtes longueurs d'onde, et plus ces ondes seront **nombreuses**. Le Soleil étant très chaud, il émet principalement des ondes lumineuses à très courtes longueurs d'onde et il en émet énormément. Celles que notre œil s'est habitué à détecter ont une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètre (un

¹ — C'est la loi fondamentale de rayonnement des corps noirs, qui a été décrite au XX^e siècle.

² — En conséquence, les ondes lumineuses à grandes longueurs d'onde sont les ondes de plus basses fréquences.



micromètre est 100 000 fois plus petit qu'un mètre). C'est ce qu'on appelle couramment la **lumière visible**. La bouilloire, elle, est beaucoup moins chaude que le Soleil: elle émet donc des rayons lumineux à plus grandes longueurs d'onde, que notre œil humain ne « voit » pas, et elle en émet beaucoup moins.

4. L'objet chaud perd une partie de son énergie et se refroidit en émettant des ondes lumineuses. Cette énergie est contenue dans les ondes émises, qui, en arrivant au contact d'un nouvel objet, sur Terre par exemple, peuvent lui **transmettre cette énergie** et le **chauffer**. Lorsqu'on dit que le Soleil « chauffe » la Terre, on signifie qu'il transmet de l'énergie en envoyant des ondes lumineuses que la Terre « absorbe ».

Résumé

- ♦ Un objet ayant une température plus élevée qu'un autre est un objet dont les atomes et molécules qui le composent s'agitent davantage et qui peuvent décharger une partie de leur énergie en émettant des ondes lumineuses. Les ondes lumineuses vont toutes à la même vitesse mais auront des longueurs d'ondes d'autant plus courtes que la température de l'objet est élevée.
- ♦ L'œil humain perçoit les ondes lumineuses uniquement pour certaines longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 micromètre.
- ♦ L'objet qui émet perd de l'énergie et se refroidit. Les ondes lumineuses émises transportent cette énergie et peuvent la transmettre aux objets qu'elles atteignent et qui, en conséquence, se réchauffent.

1.2 Le rayonnement de la Terre et les conditions d'équilibre

C'est donc l'énergie transportée par le rayonnement solaire qui réchauffe les objets célestes qu'il rencontre, et notamment la Terre. Celle-ci, étant chauffée, va émettre à son tour du rayonnement. La Terre reçoit donc de l'énergie (le rayonnement solaire), et en émet (son propre rayonnement). Ces deux rayonnements sont-ils également chargés en énergie?

Raisonnons. Nous avons vu dans la leçon précédente qu'au cours des 10000 dernières années, la température sur Terre était très stable. Si le rayonnement que la Terre recevait au cours d'une année était supérieur à celui qu'elle renvoyait, que se passerait-il? La Terre aurait un « surplus » d'énergie, donc un surplus de chaleur. Elle se mettrait donc à chauffer, tous les ans un peu plus, ce qui n'est pas ce qu'on observe sur les 10000 ans de l'holocène. De façon identique, si la Terre émettait davantage d'énergie qu'elle n'en recevait, elle refroidirait.

Résumé

- ♦ Si elle est à l'équilibre thermique, la Terre ne peut qu'émettre exactement la même quantité d'énergie qu'elle reçoit.

1.3 Le rôle de l'atmosphère et l'effet de serre

Les physiciens ont beaucoup étudié le rayonnement émis par un corps chaud et ont trouvé une équation qui prédit parfaitement la forme des ondes lumineuses émises par un corps chaud en fonction de sa température. Nous avons vu que dans le cas du Soleil, à 5700°C, la plupart des ondes lumineuses émises ont une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètres (lumière visible, du violet au rouge). Comme la température du sol terrestre est beaucoup plus faible que celle de la surface solaire, le rayonnement émis par le sol de la Terre est décalé vers les grandes longueurs d'onde. Il se situe dans ce qu'on appelle **l'infrarouge**, avec des longueurs d'ondes autour de 10 micromètres, bien loin de la lumière visible par l'œil humain³.

Ce rayonnement terrestre échappe donc à notre vision... mais pas à toutes les molécules de l'atmosphère. Certaines grosses molécules de l'air (le CO₂, l'H₂O, ...) sont sensibles aux ondes à grandes longueurs d'ondes émises par la Terre. Plutôt que de les laisser passer (comme

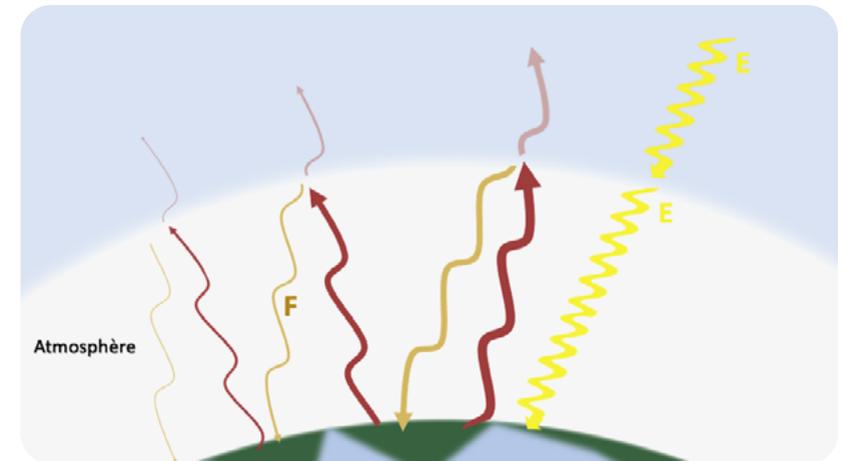
³ — On parle d' "infra-rouge" car les ondes émises par la Terre ont des fréquences plus faibles que celles de la lumière visible rouge.

une bouée dans la mer laisse passer les ondes des vagues), elles absorbent l'énergie portée par les ondes lumineuses terrestres, chauffent, s'agitent, et finissent par se décharger à leur tour, en renvoyant des ondes lumineuses dans toutes les directions. C'est encore le principe de rayonnement lumineux lié à la température des molécules qui s'applique.

Au bilan, cela signifie que la Terre ne reçoit pas seulement le rayonnement direct du Soleil, mais aussi celui qui est partiellement absorbé puis ré-émis par l'atmosphère dans sa direction. Comme un sac de couchage retient la chaleur de votre corps quand vous dormez, l'atmosphère retient une partie de la chaleur de la Terre.

On peut décomposer ces flux d'énergie en période d'équilibre climatique. Le rayonnement du Soleil (E) arrive sur l'ensemble Terre + Atmosphère. Ces ondes à courtes longueurs d'onde traversent l'atmosphère sans être interceptées par l'atmosphère. Arrivant sur le sol terrestre, une partie est directement réfléchi. Par quoi? Principalement la banquise, mais aussi les glaciers et toute autre surface de réverbération. Le reste est absorbé par la Terre: par votre peau qui rougit au Soleil, par les plantes qui utilisent cette énergie pour croître, par les océans qui chauffent.

En sens retour, la Terre chauffée renvoie des ondes lumineuses, cette fois principalement dans l'infrarouge. Les molécules comme H_2O ou CO_2 agissent alors en miroir partiel: une partie (environ 40%) des ondes terrestres est renvoyée sur Terre, et le reste traverse l'atmosphère et repart dans le système Solaire. Une nouvelle «boucle émission-absorption-réémission» est initiée comme sur le dessin ci-dessous avec les flèches beiges redescendant vers la Terre:



Au total, la Terre est donc chauffée de deux manières: par les ondes solaires directes, d'une part, et par la somme de toutes les ondes renvoyées par la couette atmosphérique, d'autre part. Appelons cette somme F. Si le climat sur Terre est stable (comme on l'a supposé plus haut), alors la Terre ne doit recevoir ni plus ni moins d'énergie qu'elle n'en émet. Autrement dit la Terre, doit être à une température telle qu'elle ré-émet exactement $E+F$. S'il n'y avait pas d'atmosphère, F serait égal à 0 et à l'équilibre, la Terre serait exactement à une température telle qu'elle renverrait une quantité d'énergie E. Sans atmosphère, les physiciens ont précisément calculé que la température (moyenne) de la Terre devrait être de $-19^{\circ}C$. En réalité, elle est de $15^{\circ}C$, soit une différence de $34^{\circ}C$. Ce n'est pas rien!

Que se passe-t-il si l'atmosphère se charge soudainement de plus de molécules de CO_2 ? On comprend que la Terre va se réchauffer, car F va augmenter, comme lorsque que vous ajoutez une couverture supplémentaire par-dessus votre sac de couchage. Il y a plus: un tel changement, soudain, dans la composition de l'atmosphère est un changement structurel. La température de la Terre, comme celle de votre corps sous les couvertures, s'y ajuste progressivement pour éventuel-

lement atteindre un nouvel équilibre. Autrement dit, un changement ponctuel mais structurel a des effets durables et on n'en observe pas immédiatement les conséquences.

Résumé

- ♦ L'atmosphère est responsable de l'«effet de serre», que l'on ferait mieux d'appeler l'effet sac de couchage ou l'effet couette, et qui réchauffe la Terre.
- ♦ Cela est dû à quelques molécules spécifiques qui agissent comme des miroirs partiels, absorbant et réémettant vers la Terre les ondes de grandes longueurs d'onde.

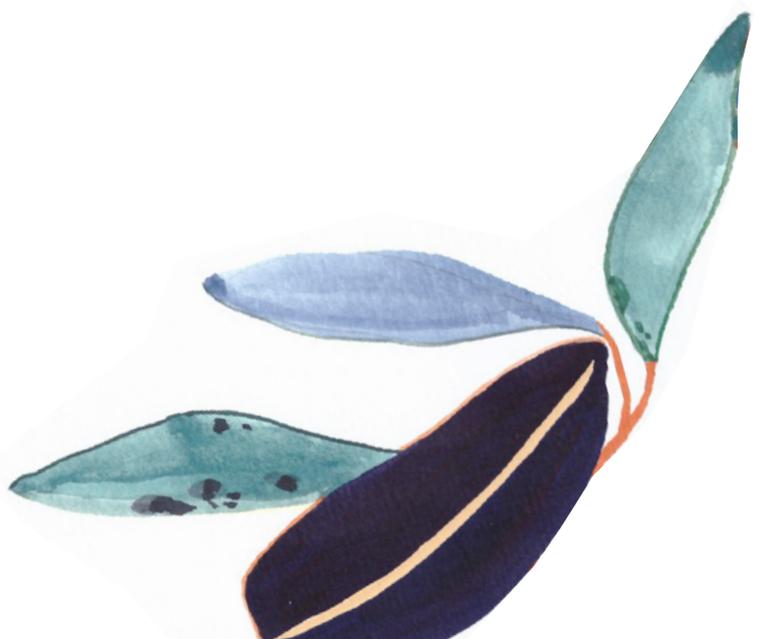
2

Les gaz à effet de serre (GES)

L'air, c'est-à-dire l'atmosphère, est un mélange de différentes molécules: il comporte essentiellement du diazote N_2 (78%) et du dioxygène O_2 (21%). L'un et l'autre sont composés de deux atomes et sont insensibles aux ondes de grande longueur d'ondes. Elles ne participent donc pas à l'effet de serre.

C'est dans le 1% restant que se joue toute l'action. L'effet de serre est dû exclusivement aux autres gaz, dont les molécules sont au moins composées de trois atomes et qui sont présents dans des quantités infimes (quelques dixièmes de pourcents pour la vapeur d'eau, moins de 0,1% pour les autres). Ils sont donc **faiblement concentrés dans l'air**, mais cela ne les empêche pas d'être d'une redoutable efficacité en matière d'effet couette.

La principale molécule responsable de l'effet de serre est la vapeur d'eau, H_2O . Sa concentration dans l'atmosphère varie beaucoup: elle est mesurée par l'**humidité relative**, qui va de 0 à 100%. Quand on atteint une humidité relative de 100%, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes, et on obtient des nuages, qui finissent par retomber en pluie, en neige ou même en grêle.

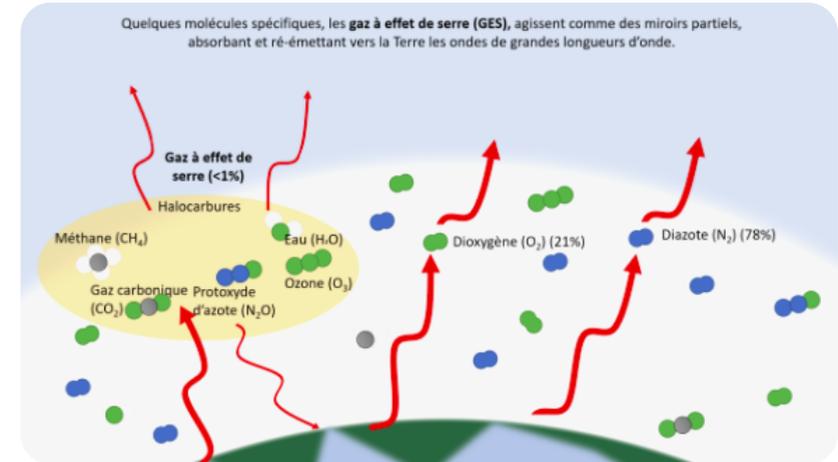


Occupons-nous des autres gaz à **effet de serre** (GES), c'est-à-dire de l'air sec. Les GES restants sont, par ordre d'importance⁴:

- le gaz carbonique, CO_2 , concentration actuelle 415ppm, mais en augmentation constante, responsable de 65% de l'effet de serre restant (c'est-à-dire hors vapeur d'eau)
- le méthane, CH_4 , concentration actuelle 2ppm, responsable de 15% de l'effet de serre restant
- les halocarbures:
 - Ce sont des gaz exclusivement d'origine industrielle, comme les fréons, qui se sont illustrés en détruisant la couche d'ozone de l'atmosphère.
 - Ils sont 16 000 fois plus absorbants des ondes lumineuses terrestres que le CO_2 , et en dépit d'une très faible concentration représentent au moins 10% de l'effet de serre hors H_2O .
 - l'ozone O_3 , pour 10%
 - le protoxyde d'azote N_2O pour 5%

3

Le forçage radiatif

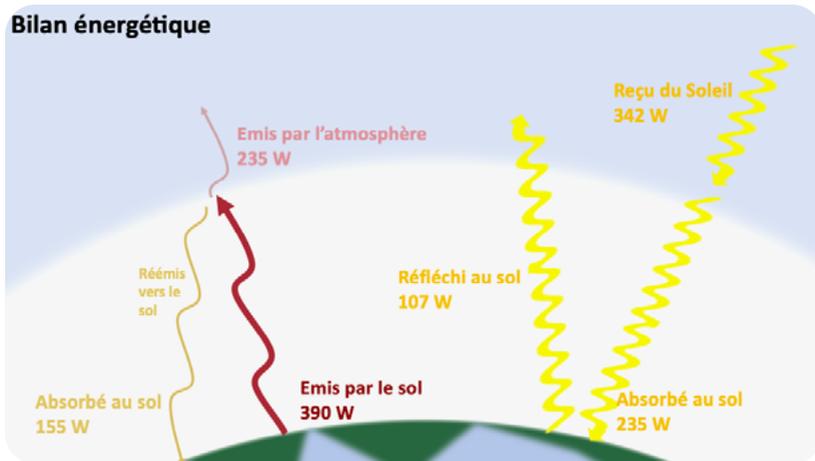


L'eau, sous forme gazeuse, est un gaz à effet de serre, mais sous forme liquide ou solide, elle a un autre effet: elle réfléchit la lumière. Une partie du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère n'est pas absorbée par le sol, mais renvoyée directement par la neige, la glace ou les nuages.

Il faut donc modifier légèrement le bilan énergétique de la Terre, qui se présente finalement comme suit (l'unité est le Watt par mètre carré):

- reçu du Soleil: 342 W/m^2
- réfléchi: 107 W/m^2
- parvient au sol: 235 W/m^2
- émis par le sol: 390 W/m^2
- traverse l'atmosphère: 235 W/m^2

⁴ — <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/effet-de-serre.xml>



Ainsi qu'on l'a expliqué, ce bilan énergétique est en équilibre depuis 10 000 ans et la température de la Terre est stable. Ce sont donc les mêmes flux qui prévalaient en 1750, en 1515, en -52 ou aux temps des pharaons. Flux entrants et sortants sont égaux: $235 + 107 = 342$.

Mais depuis deux siècles l'équilibre est rompu; la Terre n'évacue plus toute l'énergie qu'elle reçoit. La différence entre l'énergie reçue et l'énergie évacuée est appelée le **forçage radiatif**. Le terme de forçage renvoie à l'idée que cela pousse la Terre hors de son équilibre. Il est exprimé en **Watt par mètre carré** (W/m^2). En 2016, il est estimé à $3 W/m^2$ (nous reviendrons sur les mesures d'énergie et de puissance dans un prochain chapitre).

L'énergie en «surplus» va mécaniquement réchauffer la Terre et nous verrons qu'effectivement les températures moyennes augmentent depuis 1750. Et comme quand on allume le feu sous une casserole: la température de l'eau augmente, mais ce n'est pas tout: le liquide commence à s'agiter. En ce qui concerne la Terre, il faut s'attendre à ce que l'atmosphère se réchauffe, et soit traversée de courants plus violents.

Conclusion

Les gaz à effet de serre sont les molécules atmosphériques composées de trois atomes ou plus qui réagissent aux ondes à grandes longueurs d'onde émises par la Terre et ré-émettent une partie de ces ondes lumineuses vers la Terre. Elles jouent le rôle d'un sac de couchage gazeux alors même qu'elles ne représentent pas plus d'1% de la composition totale de l'atmosphère. Depuis deux siècles, la quantité de «gaz à effet couette» augmente: mécaniquement, la Terre reçoit alors plus d'énergie qu'elle n'en renvoie, et entre dans une phase de réchauffement. Nous allons voir dans les prochains chapitres que l'histoire ne s'arrête pas là. Une émission ponctuelle de gaz à effet de serre suffit à créer un surplus d'énergie et à faire sortir la Terre de l'équilibre thermique, mais nous ajoutons en outre chaque année plus de ces gaz dans l'atmosphère. La montée des températures s'accélère alors, avec toute une série d'effets en cascade, dont la plupart se renforcent.

Question pour aller plus loin

- La Terre émet-elle des ondes lumineuses avec des longueurs d'onde plus petites ou plus grandes que celles émises par le Soleil?
- Le Soleil peut-il continuer indéfiniment de renvoyer des ondes lumineuses vers l'extérieur? Que se passera-t-il pour sa température si l'on attend très très longtemps?
- Certains animaux vivent la nuit, plutôt que le jour. Au fil de l'évolution naturelle, leur vision s'est adaptée pour voir certaines ondes lumineuses mieux que nous. Pensez-vous qu'ils voient mieux les ondes à grandes longueurs d'onde ou à faibles longueur d'onde?
- Plus difficile: est-ce que ces animaux voient les mêmes arcs-en-ciel que nous?



3

**Les êtres vivants
sont tous interconnectés:
c'est la biosphère
et elle contribue
directement au
climat terrestre**



Introduction

« Cette leçon parle de biologie, des êtres vivants et de comment ils s'intègrent au climat terrestre. Avant toute chose : c'est quoi, au juste, un être vivant ? Qu'est-ce qui nous différencie, nous humains, crapauds, tulipes, de la matière dite « inerte », des pierres et de l'acier ? C'est une vaste et profonde question.

Dans cette leçon, nous allons donc poser une définition simplifiée du vivant et nous apercevoir que l'une des grandes caractéristiques des êtres vivants est d'être extrêmement dépendants de leur environnement et d'être en constante évolution. Si une astronaute met un caillou en orbite dans l'espace et repasse un an plus tard, que se passe-t-il ? À moins d'une météorite malchanceuse, elle le retrouvera parfaitement intact. Et si elle remplace le caillou par un poisson ? Ou, moins caricaturalement, par tout un bac de légumes, avec sa terre et ses vers de terre ?

En vérité, si l'on regarde à quelles conditions les êtres vivants perdurent, même sans aller les déposer dans l'espace, on se rend compte qu'ils sont très fragiles, car très dépendants les uns des autres et des conditions extérieures. Chaque être réussit à préserver sa vitalité par des stratégies sophistiquées et diverses, à condition que son environnement ne change pas trop.

Ce que nous allons aussi voir dans ce chapitre, et approfondir dans le suivant, c'est aussi que non seulement la vie sur Terre est impactée par le climat, mais que le contraire est vrai aussi ! La vie a influencé, et continue à influencer, le climat terrestre. Vous imaginez sans doute que le dioxygène que nous respirons fait partie de l'atmosphère depuis l'origine du monde, comme le décor de la scène de théâtre où sont apparus les êtres humains et avant eux leurs ancêtres vivants. Il n'en

est rien ! Le dioxygène n'existait pas il y a 3 milliards d'années. Il est apparu comme sous-produit de la photosynthèse. Il continue à être produit aujourd'hui, avec le gaz carbonique, mais sa proportion dans l'atmosphère ne varie plus car un équilibre est atteint.

C'est cet équilibre qui est en train d'être détruit. Et tout comme l'apparition de l'oxygène a tué des milliers d'êtres vivants pour qui il était toxique, à notre tour, nous avons de quoi nous inquiéter si les conditions climatiques étaient amenées à changer. »



1

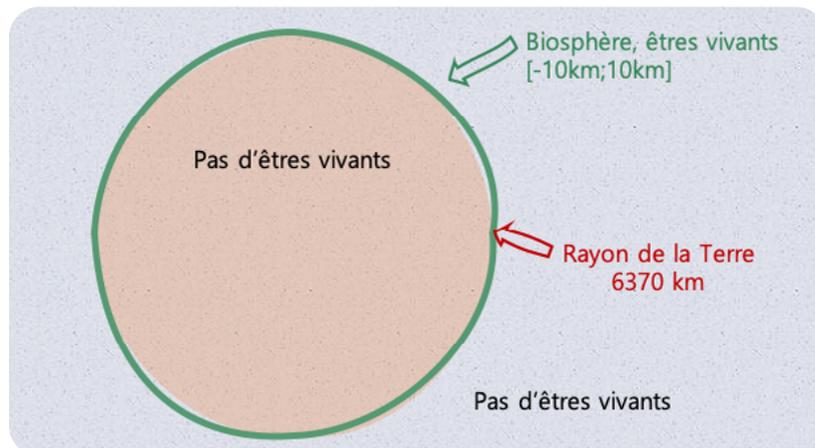
La biosphère

1.1 La vie sur Terre

Il y a de la vie sur Terre. C'est même le seul endroit de l'univers où l'on est sûr qu'il y en ait. Elle est localisée dans une très fine pellicule sur sa surface, entre -10 km (le fond des océans) et +10 km (limite de la troposphère).

C'est là, et là seulement, qu'il y a tout ce que nous connaissons de plantes, insectes, planctons, champignons, animaux, petits et gros, qui s'alimentent, se reproduisent, et constituent le milieu naturel où est née l'espèce humaine.

C'est ce qu'on appelle la **biosphère**. Le rayon de la Terre (la distance entre vos pieds et le centre de la Terre) est de 6 370 km, et la biosphère en fait 0,3%, c'est-à-dire pas grand'chose!



Lecture: Le rayon terrestre est de 6370 km (en moyenne). L'épaisseur de la biosphère en représente trois millièmes, c'est-à-dire en proportion, autant que trois millimètres sur un mètre, ou un millimètre sur trente centimètres. Si on représentait le globe comme un cercle sur toute cette page, ce serait l'épaisseur du trait. En d'autres termes, nous et nos compagnons vivants n'occupons qu'une toute petite bulle dans laquelle nous trouvons des conditions favorables à notre survie.

1.2 Interdépendances

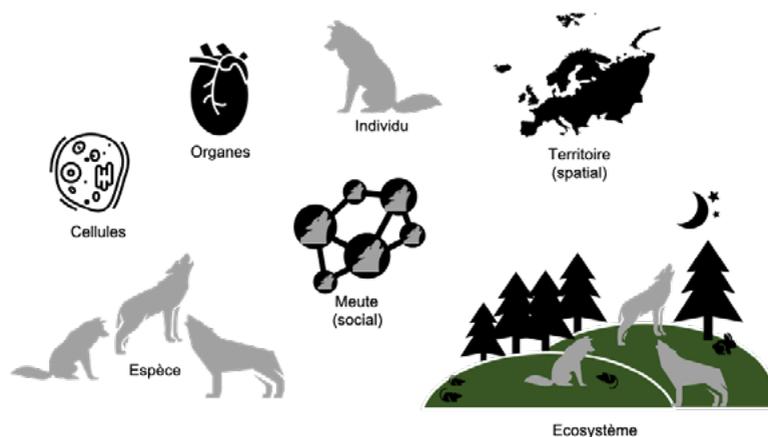
La biosphère constitue **un seul système**: il n'y a pas de sous-partie qui fonctionne en totale indépendance du reste. Tous les êtres vivants sont liés. Toutes les parties se tiennent, on ne peut pas toucher à l'une sans finalement toucher à toutes les autres.

De plus, les connexions sont **dynamiques**, c'est-à-dire qu'elles évoluent au cours du temps. Ces processus de connexion sont aussi organisés en structures multiples, entrecroisées les unes aux autres suivant des logiques différentes.

Prenons l'exemple du loup pour illustrer ce point:

- Commençons à petite échelle: nous y observons déjà une organisation biologique d'êtres vivants interconnectés. Les cellules sont regroupées en organes, chacun ayant ses propres fonctions. C'est cet ensemble interconnecté qui constitue un **individu** et qu'on appelle le loup. Notez que toutes ces structures ne sont ni complètement indépendantes (si un organe est atteint, le loup risque de mourir, et avec lui toutes les autres structures disparaissent) ni totalement dépendantes (certaines cellules meurent et sont remplacées tous les jours).
- Il est à la base d'une autre hiérarchie biologique: les individus capables de se reproduire entre eux. Ceux-ci constituent une **espèce**.

- Mais ce n'est pas fini: d'autres espèces vivent dans le même milieu et dépendent les unes des autres suivant de multiples rapports: de prédation, parasitisme, symbiose, etc. Cela imbrique le loup dans un ensemble interconnecté avec les lièvres et les renards, donc les petits rongeurs et insectes, mais aussi les grands arbres qui lui offrent des cachettes à l'abri desquelles il met bas. Ensemble, ces êtres constituent un **écosystème**.
- L'interdépendance des espèces est souvent révélée par des perturbations importantes et soudaines venues de l'extérieur. Par exemple, la réintroduction du loup dans le parc national du Yellowstone aux États-Unis a profondément modifié l'écosystème: en diminuant la population de cervidés, les loups ont changé la couverture végétale et permis à d'autres espèces animales de prospérer.⁵



⁵ — Pour aller plus loin, vous pouvez consulter: <https://academic.oup.com/jmammal/article/99/5/1021/5107035>

Lecture: Biologique, sociale, territoriale... Le loup, comme tous les êtres vivants est au cœur de processus dynamiques à des échelles temporelles et spatiales multiples.

Mais ce n'est pas tout! Le loup est aussi inséré dans d'autres hiérarchies qui se superposent à la hiérarchie des cellules > organes > individus > espèce > écosystème que nous venons de décrire, par exemple:

- **Sociale**: au sein même de son espèce, l'individu fait partie d'une meute, strictement hiérarchisée, avec des règles fixes pour la chasse, le partage des proies, la reproduction.
- **Spatiale**: sa meute est en concurrence avec d'autres meutes, et fait l'économie de conflits coûteux en se cantonnant dans un territoire bien délimité.⁶

Chacune de ces hiérarchies a sa propre logique dynamique:

- Au niveau de l'espèce, ce sont l'alimentation et la reproduction qui déterminent sa survie.
- Au niveau de l'écosystème, ce sont les mécanismes darwiniens d'adaptation qui commandent l'évolution: les espèces s'adaptent les unes aux autres et aux changements géographiques et climatiques
- Au niveau de la meute, le problème est de gérer le flux des entrants (nouveau-nés, juvéniles) et des sortants (atteints par la limite d'âge). Elle y pourvoit par l'éducation et l'apprentissage, qui apprennent aux nouveaux comment chasser, comment se comporter avec les autres, comment grimper dans la hiérarchie sociale.

⁶ — Pour en apprendre davantage et découvrir comment la délimitation du territoire, la définition des frontières, font l'objet de négociations entre meutes, lisez «Les diplomates» de B. Morizot.

- Au niveau individuel, chaque loup a une histoire: il commence comme nouveau-né, devient juvénile, puis adulte, et atteint finalement la vieillesse. Sa position dans la hiérarchie sociale change au cours du temps en fonction de ses capacités bien sûr, mais aussi de ses actions: il a une stratégie.

Notons que les diverses logiques peuvent se croiser (en définitive les règles de reproduction et de chasse adoptées par la meute doivent favoriser la survie de l'espèce) et que les échelles de temps sont très différentes d'une dynamique et d'une hiérarchie à l'autre (un loup vit une quinzaine d'années, alors que l'espèce canis lupus existe depuis cinquante millions d'années).

Notons enfin que la stabilité apparente des systèmes biologiques cache des flux permanents, où les entrées compensent les sorties: les meutes de loups peuvent subsister des dizaines d'années dans le même territoire. Les individus meurent, les chefs changent, mais c'est toujours la même meute.

Résumé

- ♦ La biosphère constitue un seul système d'êtres vivants interconnectés.
- ♦ C'est le théâtre d'une multitude de processus dynamiques, stationnaires ou non, articulés les uns aux autres, et fonctionnant à des échelles de temps et d'espace très différentes.



2

La complexité du vivant

2.1 Décrire un système physique

La matière est composée d'atomes, en grand nombre certes, mais tous identiques: on ne peut pas différencier un atome de fer d'un autre atome de fer. Cette identité permet de la décrire à l'aide de quelques mesures clés: prendre sa température, étudier sa composition (de quels atomes – «briques élémentaires» - elle est faite), mesurer sa taille...

Imaginez par exemple que vous deviez décrire un caillou de calcaire. Sa forme, au micron près, sa composition chimique (de quels atomes il est fait), sa température. Avec uniquement ces informations, une amie à vous pourrait (avec les bons instruments) aller tailler un caillou exactement identique, dans une roche calcaire de composition exactement identique et le chauffer à la bonne température. Mis à côté du premier caillou, il deviendra peu ou prou indiscernable. Et l'on peut attendre des jours, peut-être des années, on sera bien en peine de voir une quelconque différence entre les deux cailloux.

2.2 Décrire un système biologique

L'état d'un système biologique est beaucoup plus difficile à définir. On ne peut pas le résumer par quelques chiffres, comme pour un corps inerte.

Essayez de décrire un individu en bonne santé par exemple: par quoi commenceriez-vous? La température du corps est un bon indice (si la température chute à 26 degrés ou monte à 42, il y a de quoi s'inquiéter).

ter). On pourrait certainement ajouter les taux de glycémie dans le sang, le rythme cardiaque, la réaction musculaire à l'effort... mais ce ne serait encore pas suffisant! Saviez-vous par exemple que dans votre système digestif vivent quelques 150 000 bactéries qui n'ont pas le même ADN que les cellules de votre corps, sans lesquelles la digestion serait impossible et dont l'on découvre aujourd'hui qu'elles auraient une grande influence sur votre état psychique et immunitaire...

On pourrait obtenir d'autres chiffres, en prescrivant d'autres examens, mais ils ne suffiront jamais à décrire complètement l'état d'un corps humain. Et comment définir l'état de santé d'un écosystème: une mangrove par exemple, ou une forêt? Pourrait-on compter le nombre et la taille des arbres de chaque espèce? Cela ne suffira pas: pour qu'une espèce d'arbres survive dans la forêt, ses individus sont disséminés à différents endroits de la forêt, en fonction peut-être de leur âge et de leur forme. Et d'ailleurs si on ne considère que les arbres, on se trompera, car on manquera une foultitude d'interactions et d'acteurs qui assurent la pérennité de la forêt. Il faudrait, par exemple, prendre en compte les insectes (pollinisateurs ou vecteurs de maladies), les champignons qui vivent en symbiose avec leurs racines pour leur apporter les bons nutriments, les autres plantes comme le lierre qui grimpe sur leurs troncs et les animaux, y compris les carnivores (on a vu comment le loup avait changé l'écosystème du Yellowstone: cela affecta même les arbres).

2.3 Que penser des politiques de protection et de préservation de la biodiversité?

La complexité des systèmes vivants a des conséquences pratiques pour toutes les politiques de protection et de préservation de la biodiversité. Reprenons l'exemple des forêts. Il est facile d'observer qu'une forêt d'eucalyptus est très différente d'une forêt amazonienne. Mais est-ce que l'on peut faire une liste finie de toutes ces différences? Est-ce qu'on peut les mesurer, ou sont-elles purement qualitatives? Si l'on en détruit une, est-ce que l'on peut la remplacer par l'autre? La

réponse est négative, et cela pose un problème à toutes les politiques de conservation.

La biodiversité elle-même est bien difficile à caractériser, même dans un espace restreint. On sent bien qu'elle est liée au nombre d'espèces et à la qualité de leurs interactions, mais encore? Comment la mesurer? Quel sens donner aux procédures dites de compensation? Qu'est-ce que cela veut dire que je compense un Paris-Pékin en avion en faisant planter des arbres (lesquels?) quelque part (où cela?). Si je détruis un écosystème, par exemple en asséchant une zone humide pour y construire un aéroport, je ne pourrai jamais le reconstituer à l'identique. Au mieux, je pourrai construire un écosystème analogue ailleurs. Comment les comparer, comment juger que l'un compense l'autre?

Résumé

♦ Du fait de cette multiplicité d'interconnexions en constante évolution, il est très difficile de décrire et de reproduire un système vivant.



3

La fragilité du vivant

Les êtres vivants meurent. Les objets physiques inertes ne meurent pas. Si un vase est là aujourd'hui, il y a de fortes chances qu'il soit encore là demain, dans un an ou dans vingt ans. Si on le met sur orbite autour de la Terre, il tournera gentiment, sauf s'il est frappé par une météorite. Si un être vivant est là aujourd'hui, il sera peut-être là demain, mais il est peu probable qu'il soit toujours là dans vingt ans; s'il l'est, il aura beaucoup changé. Si je le mets sur orbite autour de la Terre, il mourra immédiatement.

Pour survivre, les être vivants ont besoin d'un **environnement favorable**: dans la mesure de leurs moyens, ils cherchent à **l'établir** et à **le maintenir**.

Lecture instructive en même temps qu'amusante: la bande dessinée «Dans la combi de Thomas Pesquet», qui montre les exploits techniques et la débauche d'énergie nécessaires pour maintenir en vie trois astronautes dans une station orbitale. On se rend bien compte à travers cet exemple de notre dépendance directe à un environnement propice à la vie.

Dans un environnement suffisamment favorable, les êtres vivants ont des mécanismes qui leur permettent de se maintenir. C'est ce qu'on appelle **l'homéostasie**. Ainsi, le corps humain déploie quantité d'efforts pour maintenir sa température interne autour de 37°C. Au-delà de 38°C, c'est la fièvre, et si elle atteint 40°C c'est un risque de santé majeur et immédiat. Tous les êtres vivants ont un milieu interne protégé, dont le pH et la composition sont maintenus entre des limites fixes.

Un exemple quotidien d'homéostasie du corps humain est la transpiration. Mais ce mécanisme de défense du corps en environnement hostile (car trop chaud) n'est pas toujours possible: si la température et l'humidité ambiantes excèdent certaines limites, l'être humain ne peut pas maintenir sa température interne autour de 37°C et meurt rapidement. Par exemple s'il fait seulement 40 degrés mais que le taux d'humidité est de 100%, le corps n'arrive pas à transpirer et est en danger de mort. Notons que de telles combinaisons existent déjà sur Terre et que leur fréquence va augmenter dans les années qui viennent.

Plus généralement, l'homéostasie désigne en biologie les mécanismes par lequel un état est maintenu autour d'une valeur bénéfique pour le système considéré, grâce à un processus de régulation. À travers l'exemple de la transpiration dans un hammam saturé d'eau, vous comprenez que les êtres vivants atteignent vite leurs limites à se maintenir dans un état sain.

Cela ne concerne pas seulement les individus: les espèces aussi peuvent mourir, ou plutôt disparaître. Et c'est bien logique puisque les individus d'une même espèce ont globalement les mêmes limites dans leur capacité à se maintenir dans un environnement hostile. On parle alors d'**extinction**.





Les espèces peuvent même disparaître très rapidement. Le pigeon américain, *Ectopistes Migratorius*, un oiseau grégaire qui se déplaçait en bandes de milliards d'individus (mais oui! plus que le nombre d'humains sur Terre), et dont les colonies couvraient des dizaines de kilomètres carrés, fut complètement exterminé par une chasse systématique dans les dernières années du XIX^e siècle.⁷

Source: Wikipédia

Résumé

- ♦ Les êtres vivants meurent. Les objets physiques inertes ne meurent pas.
- ♦ Pour survivre, les êtres vivants ont besoin d'un environnement favorable: dans la mesure de leurs moyens, ils cherchent à l'établir et à le maintenir.
- ♦ Dans un environnement suffisamment favorable, les êtres vivants ont des mécanismes qui leur permettent de se maintenir. C'est ce qu'on appelle l'homéostasie.

4

D'où viennent l'oxygène et l'énergie dont les vivants ont besoin?

4.1. La photosynthèse

Tout au long de la vie, les êtres vivants respirent, s'alimentent et se reproduisent. Pour survivre, les êtres humains inspirent du dioxygène (O_2), tandis qu'ils expulsent du dioxyde de carbone (CO_2) en expirant. Mais alors comment se fait-il que les animaux, dont nous sommes, n'aient pas déjà épuisé les stocks de dioxygène sur Terre?

La réponse a été trouvée par Joseph Priestley au XVII^e siècle et complétée par Jan Ingenhousz en 1778 grâce à une fameuse expérience. Premier temps de l'expérience: on place une bougie allumée sous une cloche en verre étanche. Que se passe-t-il après quelques secondes? La bougie s'éteint, à court de dioxygène nécessaire à sa combustion. Deuxième temps: on place sous la cloche une souris. Il faut attendre plus longtemps, mais à son tour, la souris meurt, privée de dioxygène pour respirer. Troisième temps: on introduit sous la cloche une plante verte. La plante ne meurt pas. On ajoute une deuxième souris: elle survit!

⁷ — Plus de détails sur l'extinction du pigeon américain: https://fr.wikipedia.org/wiki/Tourte_voyageuse



Cette expérience a été faite par Joseph Priestley au XVII^e siècle; il a ainsi constaté que les plantes sont capables de «régénérer un air vicié». C'est le premier pas vers la découverte de la **photosynthèse!**

On peut déduire une seconde chose essentielle de cette expérience fondatrice. La première souris meurt car elle inspire des molécules de dioxygène (deux atomes d'oxygène liés) et expire du dioxyde de carbone (un atome de carbone et deux atomes d'oxygène liés), qu'elle ne sait plus ré-inspirer. La plante, elle, sait faire le chemin inverse! Comment?

Allez chez le fleuriste et achetez une plante. Disons que la plante pèse 500 grammes et que la terre dans le pot pèse 5 kg. Pendant un an, vous en prenez soin, l'arrosez, l'exposez à la lumière. Après un an, la plante pèse 1 kg. Et combien pèse la terre du pot? À quelques grammes près qu'on peut négliger, elle pèse toujours 5 kg! Mais alors, où la plante a-t-elle pris ses 500g supplémentaires? De la terre? De l'air? De l'eau d'arrosage? Des trois à la fois?



La réponse est de l'air et de l'eau d'arrosage. C'est la photosynthèse: la plante prélève le carbone contenu dans le CO₂ de l'atmosphère, les atomes d'hydrogène et d'oxygène de l'eau H₂O, et les fixe sous forme de matière organique. Ainsi, si on brûle la plante, on libèrera le carbone emprisonné dans cette matière organique, et il retournera dans l'atmosphère sous forme de CO₂. C'est logique!

Résumé

- ♦ La photosynthèse est le mécanisme «complémentaire» de la respiration des animaux, par lequel les plantes absorbent du dioxyde de carbone (CO₂) pour renvoyer du dioxygène (O₂).
- ♦ Les animaux dont nous sommes dépendent donc absolument des plantes et des autres êtres vivants comme le plancton pour fabriquer l'oxygène dont ils ont besoin.
- ♦ La photosynthèse est une manière de stocker le rayonnement solaire sous forme chimique. C'est le processus par lequel la plante grandit en fixant les uns à la suite des autres des atomes de carbone qu'elle récupère dans le CO₂ qu'elle «inspire» et qu'elle mélange à l'eau qu'elle «boit».
- ♦ Pas étonnant qu'en coupant du bois et en le brûlant, on libère dans l'air... du carbone!

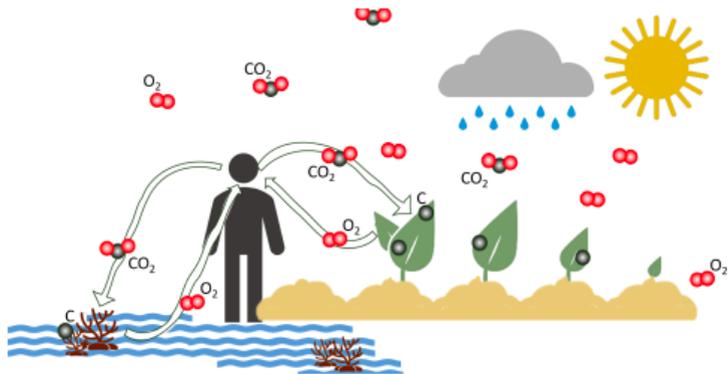


4.2. Le cycle de l'oxygène

Au tout début de l'histoire de la Terre, il n'y avait pas d'oxygène dans l'atmosphère! Cela paraît presque incroyable. C'est l'apparition de la photosynthèse, avec les plantes et les bactéries, qui a donné à notre planète son oxygène atmosphérique, il y a 2,3 milliards d'année, et l'a maintenu depuis au niveau actuel de 21% de la composition de l'air en dépit de sa consommation par la respiration des êtres vivants, et des diverses combustions.

Il y a donc un cycle de l'oxygène:

- d'un côté il est absorbé régulièrement par les animaux et par les plantes, pour leur «respiration»
- de l'autre, il est émis par les plantes, au cours de la photosynthèse



Lecture: Sous l'effet de la lumière, les plantes (plantes terrestres, algues, plancton océanique...) «inspirent» le CO₂ expiré par les animaux et renvoient de l'O₂.

Notre survie en tant qu'espèce dépend donc entièrement de ce service rendu par les plantes et le plancton! Le bilan est globalement équilibré, les continents et l'océan produisant respectivement 16,5 et 13,5.10¹⁰ kg d'oxygène par an.



Conclusion

Pour écrire la première version de ce chapitre, nous étions attablés dans le bureau d'Ivar à Paris. Pour la relire, nous nous retrouvons sur Zoom. Entre-temps, le coronavirus s'est invité dans nos vies, illustrant trop bien l'interdépendance et la fragilité du monde vivant que ce chapitre décrit.

La science moderne découvre (ou redécouvre) aujourd'hui la richesse et l'infinité des liens qui nous enchevêtrent dans ce grand système qu'on appelle biodiversité. Nous maintenir en vie, en bonne vie, suppose donc de ménager ces liens, des bactéries de nos estomacs jusqu'aux pangolins de forêts lointaines.





4

Sur Terre et dans l'atmosphère, le carbone circule en permanence. Que se passe-t-il quand les activités humaines modifient les flux vers l'atmosphère ?



Introduction

«Aussi étrange que cela puisse paraître, l'atmosphère terrestre actuelle n'a pas toujours été celle qu'on connaît et qu'on respire aujourd'hui. Son histoire est intimement liée à celle des êtres vivants. Certes, la Terre primitive, il y a quatre ou cinq milliards d'années, avait une atmosphère, mais elle était très différente de celle que nous connaissons actuellement: il n'y avait pas d'oxygène.

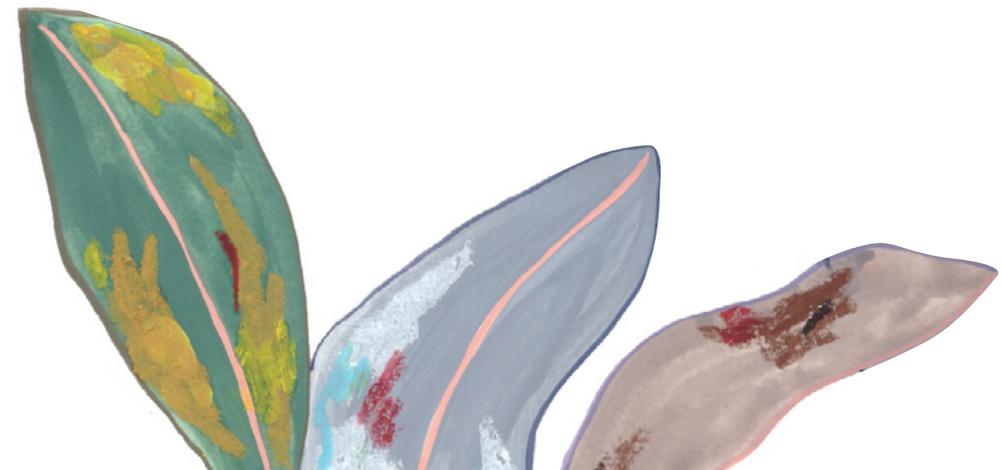
L'oxygène n'apparaît que beaucoup plus tard, il y a deux ou trois milliards d'années, émis par les premiers organismes vivants. Pour beaucoup d'autres êtres vivants, il était toxique, comme le serait pour nous humains un air chargé de soufre, et ces êtres ont disparu. L'oxygène n'a atteint son niveau actuel, environ 20% de l'air, qu'il y a 600 millions d'années.

Qu'est-ce qu'on veut-dire en disant que «les êtres vivants émettent de l'oxygène»? Les atomes d'oxygène ont toujours existé sur Terre, mais sous différentes formes et prises dans différentes molécules. Certains êtres vivants ont des organismes qui «digèrent» ces molécules, les décomposent, et les recomposent autrement avant de les re-larguer dans l'air.

Aujourd'hui du dioxygène est émis en permanence par les plantes sous l'effet de la lumière du soleil: c'est la photosynthèse, que nous avons vue dans la précédente leçon. Ce dioxygène est réabsorbé en permanence par la respiration des animaux, et par tous les phénomènes d'oxydation et de combustion. Il y a donc un cycle de l'oxygène: chaque molécule qui passe dans l'atmosphère n'y reste que temporairement et la quittera au bout d'un temps plus ou moins long.

Cette histoire de cycle n'est pas propre à l'oxygène. Tous les gaz de l'atmosphère, ou presque tous, ont leur propre cycle: ils y sont émis par certains processus et absorbés par d'autres. L'atmosphère est un lieu de stockage temporaire, avant d'être renvoyé ailleurs sur Terre, comme une baignoire reliée à une nappe phréatique dont on recyclerait l'eau en permanence. Si le niveau de l'eau est constant dans la baignoire, ce n'est pas parce que l'eau stagne, c'est parce que l'arrivée compense exactement la sortie.

Le cycle le plus connu, après celui de l'oxygène, est le cycle du CO₂. Et c'est bien sûr celui qui nous intéresse pour étudier l'effet de serre et les changements climatiques. Le cycle du CO₂ a ceci de particulier que le trou d'évacuation de la baignoire est très étroit. Ainsi si on déverse du CO₂ supplémentaire dans l'atmosphère (par exemple en brûlant du bois ou du pétrole), cet excédent se fera sentir pendant plusieurs siècles.»

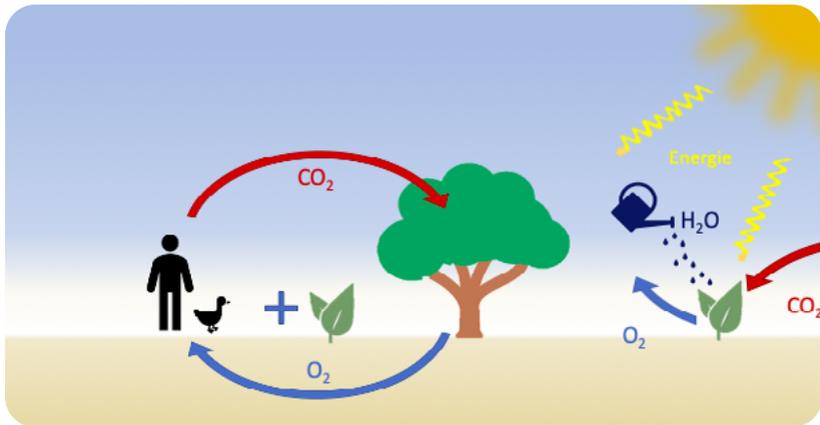


1

Plantes et planctons dans la photosynthèse

Sous l'action du Soleil et lorsqu'elles reçoivent suffisamment d'eau, sont capables d'absorber le CO_2 gazeux et d'émettre en retour du dioxygène O_2 . C'est la photosynthèse. Si la photosynthèse a lieu grâce à l'énergie transmise par les ondes lumineuses du Soleil, que se passe-t-il la nuit?

La circulation s'inverse, car les plantes respirent, elles aussi!



Lecture: Le jour, les plantes réalisent la photosynthèse. La nuit elles respirent comme les animaux.

Notre vie (et celle de tous les animaux) dépend donc de la capacité qu'ont les plantes de fabriquer de l'oxygène à partir de gaz carbo-

nique. Le domaine des « plantes » est très vaste et va bien au-delà des arbres et des fleurs de nos jardins. Il va de la forêt amazonienne au phytoplancton dans les océans. Les **phytoplanctons** sont des plantes marines microscopiques, flottant à la surface des océans. Elles ne sont pas visibles à l'œil nu, mais on peut visualiser leur distribution sur les océans par satellite, et elles sont cruciales pour l'alimentation des animaux marins, soit qu'ils s'en nourrissent directement (baleines), soit qu'ils soient à la base de la chaîne alimentaire.

D'ailleurs que pourrions-nous appeler le « poumon de la planète »? On parle toujours de la forêt amazonienne. Mais le phytoplancton est beaucoup plus efficace, si l'on considère la quantité de CO_2 qu'il réussit à séquestrer durablement sur Terre. En effet, la végétation terrestre, même quand elle n'est pas coupée et brûlée par les humains, finit par mourir, et se décompose à l'air, absorbant de l'oxygène et renvoyant du CO_2 dans l'air, comme une respiration très lente. Au contraire: le phytoplancton, quand il meurt, a une bonne chance de tomber au fond de l'océan, dans un milieu pauvre en oxygène et le carbone qu'il contenait reste piégé au fonds de l'océan. Le bilan global lui est favorable, si bien que l'on considère que plus de la moitié de l'oxygène que nous respirons « provient » du phytoplancton. Nous sommes donc comme les baleines: notre survie dépend de petites plantes qui sont à des milliers de kilomètres de nous et que nous ne voyons même pas. Bel exemple d'interdépendance d'espèces vivantes sur la planète Terre.⁸

⁸ — L'instrument SeaWiFS de la NASA examine les océans et les terres pour observer la flore et le phytoplancton. Pour découvrir l'instrument SeaWiFS, vous pouvez consulter: <https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a002000/a002077/index.htm>



Résumé

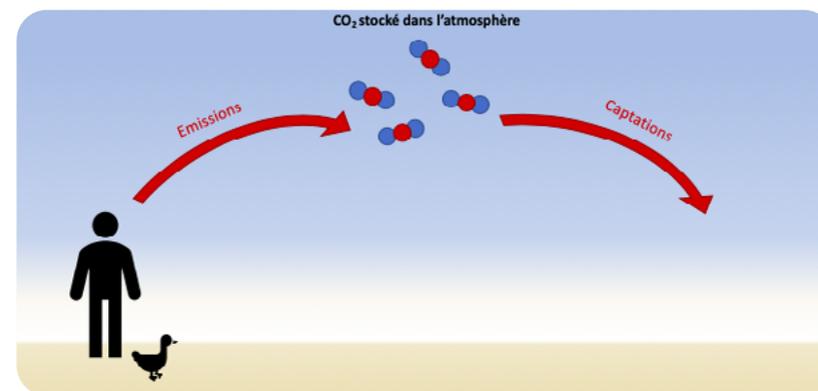
- Les plantes profitent de l'énergie du rayonnement solaire pour « inspirer » le CO_2 dans l'air et synthétiser des molécules contenant ce carbone qu'elles « inspirent ».
- Ce faisant, elles extraient de l'atmosphère du gaz carbonique et y rejettent du dioxygène que nous respirons.
- En termes de captation « nette » de carbone sur Terre, le plancton océanique est encore plus efficace que les plantes ordinaires car lorsqu'il se décompose, le carbone qu'il contient reste piégé au fond des océans.



2

Cycle du CO_2

Revenons au thème central de ce cours: le climat. Nous avons vu dans les deux premières leçons que l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère était le principal facteur d'effet de serre, qui réchauffe la Terre.

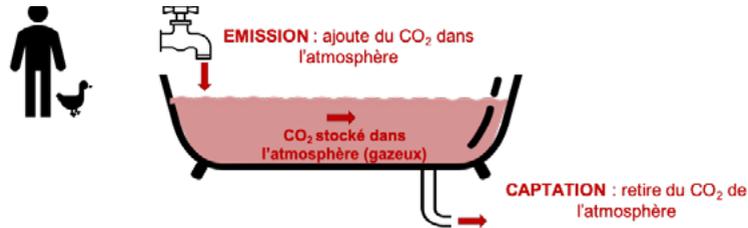


Pour comprendre ce qui détermine la quantité de CO_2 dans l'atmosphère, concentrons-nous dans le schéma précédent sur les échanges de carbone. D'un côté les émissions, de l'autre la captation, entre les deux: le CO_2 stocké dans l'atmosphère.

On peut voir ce problème comme celui d'une baignoire. Deux choses déterminent la quantité stockée dans la baignoire atmosphérique: la quantité émise par le robinet d'une part, et la quantité évacuée par la bonde d'autre part. Où va le carbone qui est évacué par la bonde? Il est tout simplement stocké quelque part sur Terre, par exemple dans les plantes.

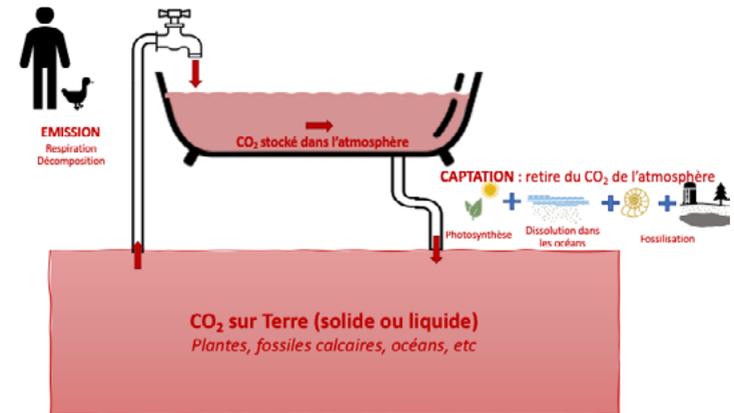


En fait, l'immense majorité du carbone de notre planète (terre et atmosphère) est stockée sous forme solide sur Terre, lié à du calcium et de l'oxygène: ce sont les roches calcaires, et les coquilles des animaux, notamment des coraux. En effet, le CO₂ atmosphérique peut se dissoudre dans l'océan et on estime que les océans contiennent 50 fois plus de carbone que l'atmosphère! Une partie de ce carbone flottant est récupérée par les animaux marins pour faire des coquilles, qui se retrouveront des millions d'années après sous forme de roches calcaires.

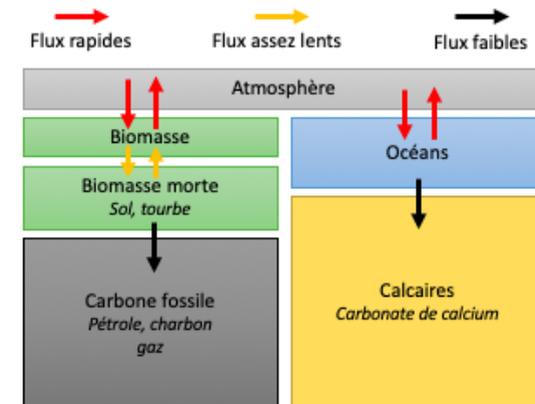


En ce qui concerne le carbone terrestre hors océans, il est fixé par les plantes et les animaux, et retournera lentement dans l'atmosphère quand ceux-ci se décomposeront. Il peut se faire cependant que certains échappent à la décomposition en raison de circonstances particulières, par exemple parce qu'ils sont ensevelis dans des marais, loin de l'oxygène de l'air. C'est l'origine des carburants fossiles: charbon, gaz ou pétrole.

Hors intervention humaine, plusieurs mécanismes assurent donc la captation du CO₂ atmosphérique sur Terre (photosynthèse, dissolution dans les océans, etc.) et inversement, plusieurs mécanismes engendrent de nouvelles émissions vers l'atmosphère (respiration, décomposition, etc.)



Bien sûr, ces différentes formes de captation ne se font pas sur les mêmes **échelles de temps**. Une inspiration suivie d'une expiration a lieu en quelques secondes. Un arbre vit quelques dizaines d'années avant de se décomposer. Mais les roches calcaires ou les nappes de pétrole ont mis plusieurs centaines de millions d'années à se constituer. C'est ce qui est représenté sur le schéma fonctionnel suivant:



Résumé

- ✦ Pour le CO₂, comme pour le dioxygène, l'atmosphère se comporte comme une baignoire: les molécules n'y sont stockées que temporairement, et sont en permanence re-captées sur Terre, avant d'être à nouveau émises dans l'air.
- ✦ Le stock de carbone dans la baignoire atmosphérique est déterminé par les quantités émises relativement aux quantités captées.
- ✦ Le principal lieu de stockage terrestre du carbone est les océans, où le carbone atmosphérique est photosynthétisé par le plancton ou directement dissout.
- ✦ Certains processus d'émissions ou de captations sont très rapides (respiration, décomposition, ...) tandis que d'autres sont extrêmement longs (formation des roches calcaires, formation du pétrole et autres fossiles carbonés, ...).

3

Hors de l'équilibre

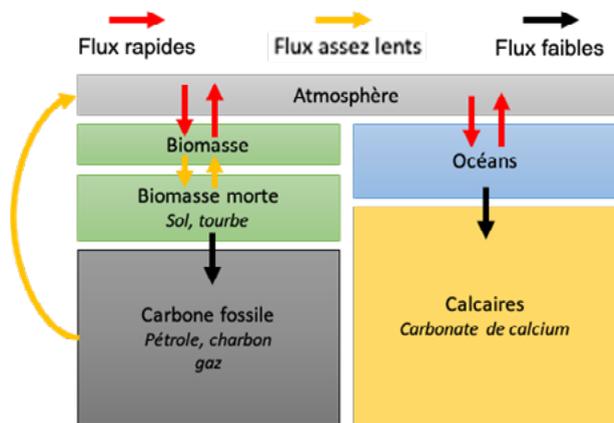
3.1 Le cycle du carbone déséquilibré

Ce cycle du carbone a été en équilibre jusque vers 1850, c'est-à-dire que les émissions dans l'atmosphère étaient équilibrées par les captations sur Terre. Ainsi la quantité de CO₂ dans l'atmosphère restait stable.

Depuis 1800, ce processus est perturbé par l'utilisation humaine des combustibles fossiles.

On a vu que le pétrole, le charbon et autres fossiles ne sont rien d'autre que du carbone lentement amalgamé avec d'autres atomes et stocké sur terre ou sous terre. En les brûlant, on fracture ces amalgames et on libère le carbone sous forme de gaz.

Voilà donc deux siècles que l'on injecte directement dans l'atmosphère des quantités supplémentaires de CO₂ qui ne s'inscrivent pas dans les cycles naturels.



Où va ce CO₂ supplémentaire, que l'atmosphère n'était, pour ainsi dire, pas habituée à recevoir? Un quart environ se dissout dans l'océan, un tiers est capté par les plantes, et le reste stagne dans l'atmosphère. C'est ce stockage qui entraîne un accroissement de l'effet de couette, et donc un réchauffement de la planète. C'est le forçage radiatif, que nous avons défini dans les leçons précédentes.

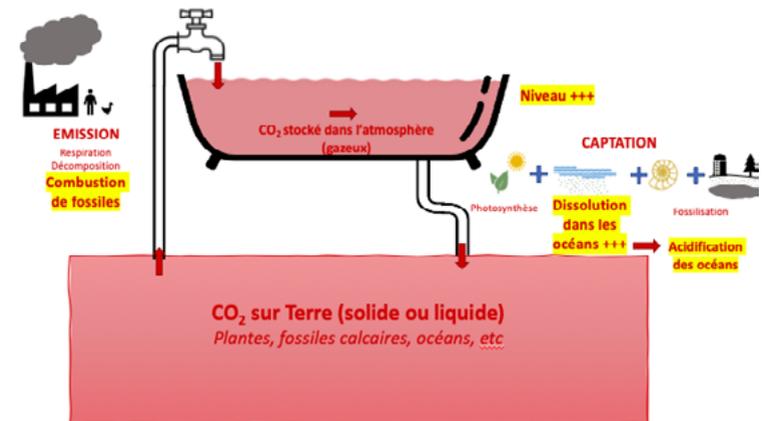
3.2 Un double problème

À vrai dire, le problème est même double: non seulement la combustion de fossiles augmente les émissions mais elle réduit aussi la capacité de captation des océans.

On estime que 20 à 30% du CO₂ excédentaire dans l'atmosphère (émissions d'origine humaine) est absorbé par les océans sous forme dissoute. À côté du cycle du carbone atmosphérique qui sature, il y a donc un puits de carbone océanique, qui stocke une partie du carbone excédentaire. Ce stockage excédentaire rend les océans plus **acides** (cela se vérifie en mesurant leur pH et en constatant qu'il diminue). C'est le phénomène d'acidification des océans, sur lequel nous reviendrons, et qui est un autre marqueur important du réchauffement

climatique. Malheureusement, l'acidification rend l'océan moins capable d'absorber du CO₂, et donc de jouer le rôle de puits de carbone, comme si en demandant à la bonde de la baignoire d'évacuer plus d'eau elle se bouchait.

Si nous revenons à notre baignoire, nous comprenons donc que le niveau augmente:



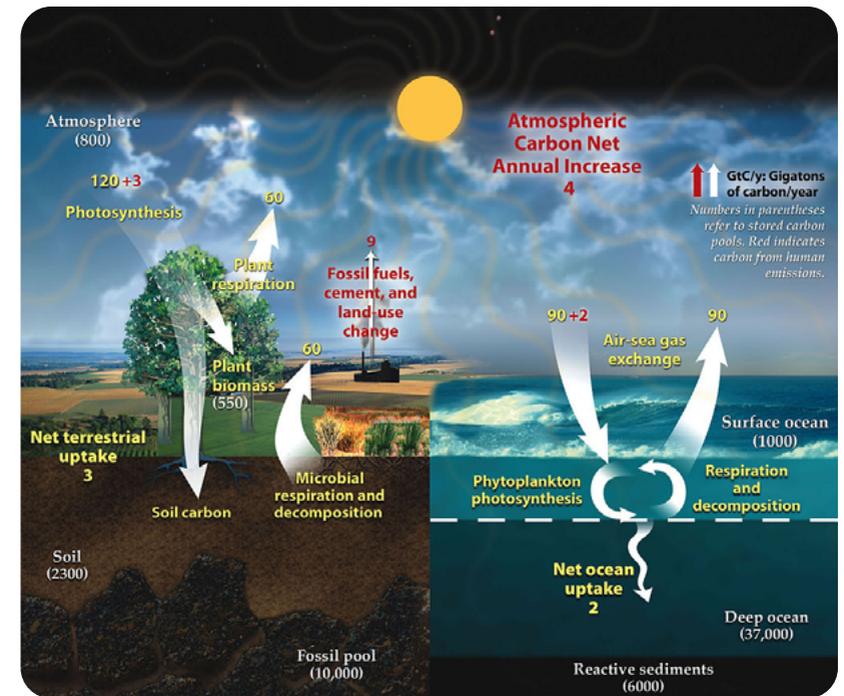
3.3 La circulation du carbone en chiffres

La figure⁹ suivante montre les stocks (en blanc, entre parenthèses) et les flux de carbone (en jaune et rouge) en gigatonnes de carbone par an (une gigatonne représente un milliard de tonnes). Le carbone apparaît ainsi sous différentes formes et lié à différents éléments chimiques. Remarquons d'abord que les stocks sont significativement plus importants que les flux. L'immense majorité du carbone est stockée sous

⁹ — Source: http://www.starch.dk/private/energy/img/CO2%20Balance.pdf?fbclid=IwAR3KlgwglAUzYFMKZtpXpvz56XJug1D_D4yamL2qzfU5joT1x9kR6ckrNDg

forme solide ou liquide. Lié à du calcium et de l'oxygène, il constitue les roches calcaires, et les coquilles des animaux, notamment des coraux. Enfoui sous terre, en association avec de l'hydrogène: il forme le pétrole. La proportion de carbone gazeux dans l'atmosphère représente moins de 1% du stock total et apparaît en association avec de l'oxygène: c'est le gaz carbonique, le fameux CO₂.

Flèches et chiffres en jaune indiquent ensuite les flux annuels: on voit que du carbone ne cesse d'être échangé vers et depuis l'atmosphère. Aux flux naturels (respiration, dégradation, photosynthèse...) s'ajoutent depuis deux siècles les émissions humaines (en rouge). 9 Gigatonnes sont envoyées dans l'atmosphère, dont 3 boostent la photosynthèse des plantes et 2 sont captées par les océans. Ce surplus d'émissions se conclut par un solde positif de quatre gigatonnes de carbone par an dans l'atmosphère. Tous les ans, ce sont donc environ seize gigatonnes de CO₂ supplémentaires qui s'accumulent dans l'atmosphère¹⁰. Pour combien de temps?



Cycle du carbone et bio-séquestration

Source: US Department of Energy, [http://www.starch.dk/private/energy/img/CO₂%20Balance.pdf](http://www.starch.dk/private/energy/img/CO2%20Balance.pdf)

¹⁰ — Un atome de CO₂ contient deux molécules d'oxygène pour une seule de carbone. Il y a donc un facteur de conversion: quatre (plus précisément, 3,67) tonnes de CO₂ ne contiennent qu'une tonne de carbone.

Résumé

- ♦ Le cycle du carbone a été en équilibre jusque vers 1850, et depuis il a été perturbé par l'utilisation des combustibles fossiles.
- ♦ Cela rejette dans l'atmosphère des quantités de CO₂ qui dépassent les capacités d'absorption des terres et des océans
- ♦ Ce carbone excédentaire est partiellement dissout dans l'océan, qui s'acidifie, ce qui atténue sa capacité de captation. Une autre partie est captée par la photosynthèse des plantes.
- ♦ Tous les ans, ce sont donc seize gigatonnes de CO₂ supplémentaires qui s'accumulent dans l'atmosphère.

4

Durée de vie dans l'atmosphère

4.1 Une question qui ne date pas d'hier

Reprenons l'image de la baignoire: le robinet, ce sont les émissions de CO₂. La bonde, ce sont les absorptions. Ce qui reste dans la baignoire, c'est le stock dans l'atmosphère. L'ensemble était à peu près équilibré avant 1800. Il rentrait dans la baignoire autant de CO₂ qu'il en sortait, et le niveau de l'eau était donc stable. Nous avons vu dans la toute première leçon que la proportion de CO₂ dans l'atmosphère s'est ainsi maintenue autour de 280 ppm¹¹ jusqu'en 1800.

Depuis, l'utilisation des combustibles fossiles (le charbon d'abord, le pétrole ensuite, le gaz enfin) est venue s'ajouter aux émissions de CO₂ naturelles. Le débit du robinet a augmenté et le niveau de CO₂ dans la baignoire atmosphérique s'est élevé. La proportion de CO₂ dans l'atmosphère atteint aujourd'hui 416 ppm, pas loin de deux fois plus qu'avant la Révolution industrielle!

Comment est-ce possible que la combustion du charbon pour les premières machines à vapeur anglaises nous impacte encore aujourd'hui? Et si on arrêta aujourd'hui de brûler des combustibles fossiles, combien de temps faudrait-il à l'atmosphère pour retrouver les niveaux de CO₂ naturels? Autrement dit: si on ramène le débit du robinet à

¹¹ — Rappel: une concentration de 280 ppm du CO₂ signifie que sur un échantillon aléatoire d'un million de molécules dans l'air atmosphérique, il y a en moyenne 280 molécules de CO₂.

son niveau antérieur, combien de temps faudrait-il à la baignoire pour retrouver son niveau antérieur?

4.2 Une analogie pour comprendre la durée de vie du carbone dans l'air

C'est en fait une question sur l'efficacité de la bonde et sa capacité à évacuer plus que le flux ordinaire.

Imaginez que vous êtes en 2025, et votre municipalité a mis en place une réglementation plus stricte sur la collecte des déchets: n'est autorisé qu'un sac de 5L maximum par personne par semaine (tout le monde se met au vrac!), avec un petit surplus pour circonstances exceptionnelles autorisé à hauteur de 0,2 L par semaine.

Arrive la date de votre anniversaire: vous invitez une flopée d'amis, autour d'un bon repas et de quelques bouteilles. Mais le lendemain, panique: votre sac poubelle fait 9L, au lieu des 5 autorisés! Combien de temps cet excédent d'ordures va-t-il encombrer votre cuisine?

Profitant du surplus hebdomadaire autorisé, vous allez patiemment sortir 5,2L par semaine pendant plusieurs semaines consécutives. Par un petit calcul, on voit qu'il faudra 20 semaines pour revenir au niveau d'avant votre anniversaire. Pour éviter les mauvaises odeurs, vous allez bien sûr optimiser les ordures dont vous vous débarrasserez chaque semaine (plutôt évacuer les plus anciennes en priorité), de sorte que le dernier sac de 5,2L ne contiendra bien sûr plus aucune des capsules de bière de votre soirée.

L'important n'est pas l'ordure de votre anniversaire prise isolément, mais le changement durable de niveau d'ordures qu'a entraîné l'excédent ponctuel de votre anniversaire. Le niveau d'ordures dans votre cuisine aura pendant 20 semaines gardé la trace de l'excédent ponctuel.

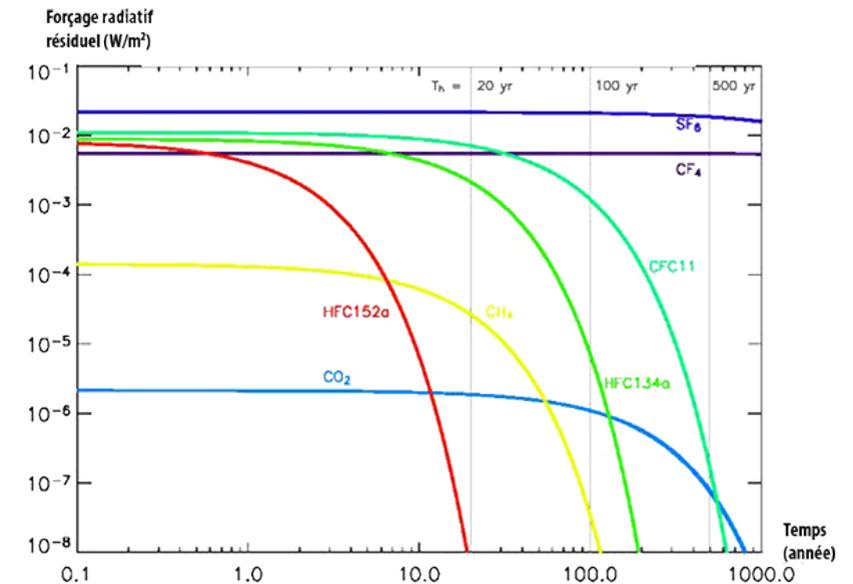
4.3 Forçage radiatif résiduel

C'est exactement ce qu'il se passe dans la baignoire atmosphérique avec l'excédent de CO_2 émis au cours des dernières décennies. Parce que seule une portion excédentaire peut être évacuée, le stock restera encore pour de très nombreuses années au-dessus de son niveau « naturel » habituel.

Le graphique ci-dessus précise ces durées de « persistance » dans l'atmosphère pour différents GES, aussi appelées « durées de vie ». Chaque courbe indique la durée de la trace que laisse une unité excédentaire du gaz dans l'atmosphère en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de renforcement de l'effet de serre à partir de sa date émission. Attention, l'axe horizontal, en années, est sur une échelle logarithmique, de sorte que le marqueur à gauche du chiffre 10 indique la 9^{ème} année après émission mais celui de droite marque l'année 20.¹² L'axe vertical est lui aussi gradué de façon logarithmique: on comprend donc que le CO_2 au moment de son émission est environ cent fois moins puissant en termes d'effet de serre que le méthane CH_4 en jaune, mais voit ses effets persister 10 fois plus longtemps. En effet, observez la courbe bleue: on voit que l'effet réchauffant d'une tonne de CO_2 supplémentaire émise aujourd'hui sera à peu près constant pendant un siècle. Il faudra attendre 1000 ans pour l'effet soit divisé par dix! On exprime cela habituellement en disant que le CO_2 émis aujourd'hui « reste » un siècle dans l'atmosphère et ne « disparaît » qu'au bout de mille ans. Le CO_2 que nous émettons aujourd'hui va donc réchauffer l'atmosphère pendant plusieurs siècles!

¹² — Les graduations sont en années mais les marqueurs ne sont pas équidistants: ce sont leurs logarithmes qui le sont. Par exemple: $\log(100) - \log(10) = \log(1000) - \log(100)$. Ce type d'échelles est particulièrement utile pour représenter sur un même graphique des données variant sur des échelles très différentes (quelques années ou des centaines d'années). Pour mieux comprendre l'échelle logarithmique: <https://youtu.be/HWEZZ7fk4JA>.

Étonnant: les courbes noires et violettes ne diminuent jamais! L'effet de forçage radiatif persiste indéfiniment. En effet, il s'agit du SF_6 et du CF_4 , deux molécules contenant du fluor et produites exclusivement par l'industrie. Le fluor est un élément chimique extraordinairement réactif, et qui n'est présent dans la nature que sous forme de minéraux stables. Historiquement, il a été très difficile de l'isoler, mais une fois qu'on y est arrivé, on s'en est servi pour fabriquer des composés qui ont des propriétés industrielles intéressantes, comme liquide réfrigérants (dont les fameux CFC qui détruisent la couche d'ozone) ou isolants électriques (c'est le cas du SF_6). Comme ils ne font pas partie d'un cycle naturel et qu'ils sont chimiquement stables en raison des propriétés du fluor, ils ne sont jamais réabsorbés par les continents ou les océans, et une fois émis ils stagnent éternellement dans l'atmosphère. Voilà peut-être la forme la plus pure d'un « déchet ».



Persistance de l'effet de forçage radiatif après émission

Source: D. Hauglustaine, LSCE, cité par <https://jancovici.com>

Résumé

- ✦ Lorsqu'un gaz est émis par l'activité humaine de façon «excédentaire» dans l'atmosphère, le système naturel va mettre un certain temps avant de revenir à l'équilibre.
- ✦ La durée durant laquelle on continue d'observer la trace d'un excédent ponctuel est appelée «durée de vie» d'un gaz.
- ✦ Pour un GES, l'important n'est pas sa trace en quantité mais sa trace en termes de forçage radiatif.
- ✦ La durée de vie du carbone est particulièrement longue (environ 1000 ans). Pour diviser par 10 l'effet de forçage d'une unité excédentaire de CO₂, il faut donc attendre pas moins de 500 ans!

5

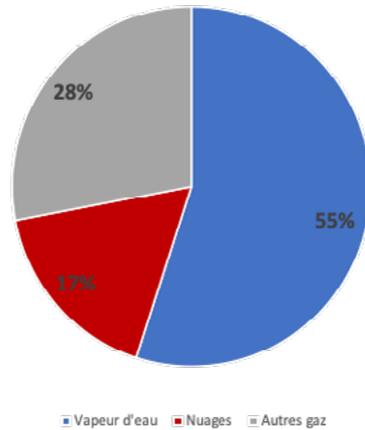
Et la vapeur d'eau dans tout ça ?

Une question subsiste: pourquoi, dans la figure précédente, ne parle-t-on pas de la vapeur d'eau? Pourtant, on a vu dans la leçon sur l'effet couette qu'H₂O est un GES plus puissant que CO₂. Le camembert suivant montre qu'il est responsable, sous forme gazeuse ou condensée (nuages) des presque trois quarts de l'effet de serre de la planète.

La réponse est qu'il y a un cycle naturel de l'eau: présente en quantité énorme dans les océans et un peu sur les continents sous forme d'eau douce, elle s'évapore et retombe en pluie. Les émissions humaines ne perturbent pas ce cycle, parce qu'elles sont infimes par rapport aux émissions naturelles, comme l'évaporation des océans. Elles ne s'accumulent pas non plus dans l'atmosphère car celle-ci ne peut pas accumuler indéfiniment de la vapeur d'eau: au-delà d'une certaine limite, elle se condense et retombe en pluie. C'est comme si votre baignoire d'H₂O avait une trappe d'évacuation, ce qui détermine un niveau maximal que le stock ne peut donc pas dépasser! Cette limite augmente avec la température, ce qui déclenche un cercle vicieux: plus la température moyenne de l'atmosphère augmente, plus elle est capable de stocker de vapeur d'eau, ce qui renforce l'effet de serre.



Répartition des contributions à l'effet de serre « naturel » des différents gaz présents dans l'atmosphère



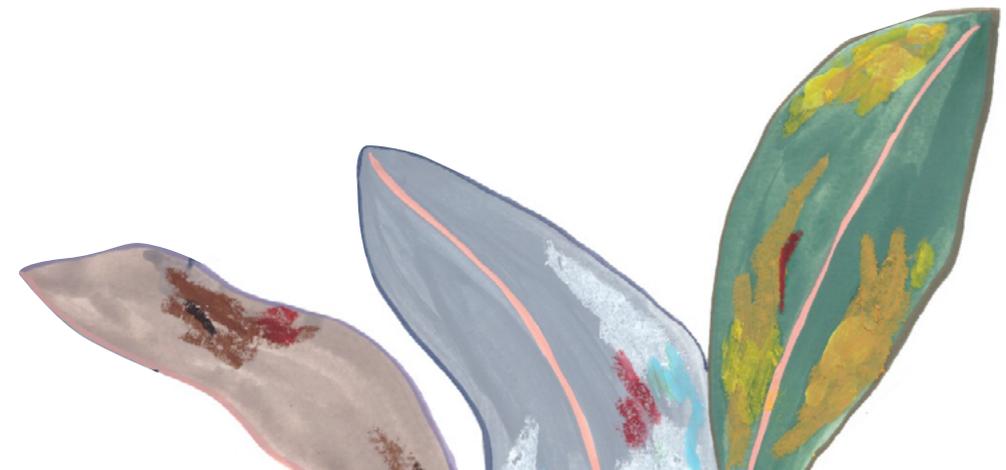
Résumé

- Les émissions humaines supplémentaires de vapeur d'eau sont négligeables par rapport aux émissions naturelles et ne s'accumulent pas dans l'atmosphère. Ce mécanisme de saturation n'existe pas pour le CO₂.
- Le réchauffement climatique renforce l'effet de serre naturel du H₂O.

Conclusion

Les atomes de carbone sur Terre et dans l'atmosphère se répartissent ainsi de façon dynamique, suivant de grands cycles naturels. Chaque plante, chacune de vos respirations participe à ces cycles, même si elles ne représentent qu'une infime poussière dans ces grands mouvements d'ensemble.

Cependant, depuis la Révolution industrielle, les sociétés humaines puisent dans les réserves fossiles, denses réservoirs de carbone constitués au cours de centaines de millions d'années. Comme dans la scène de l'apprenti sorcier de Fantasia, ces émissions excédentaires créent un déséquilibre à l'échelle planétaire qu'il devient très difficile de maîtriser. Les capacités de compensation naturelle par la captation sont limitées, d'autant plus limitées que le réchauffement s'accroît, et cette persistance des gaz à effet de serre dans l'atmosphère sur plusieurs centaines d'années prolonge d'autant leur impact sur l'effet de serre.





5

Observations,
expérimentations
et interprétations
convergent: démarche
scientifique et
climatoscepticisme ne
vont pas bien ensemble



Introduction

«Après ces quatre premiers chapitres sur l'histoire de la Terre et du climat, nous allons entrer un peu plus dans le feu de l'action. Et plus précisément à la rencontre des climatosceptiques. Parmi eux, certains disent qu'il ne se passe rien, d'autres que cela se réchauffe mais que ce n'est pas le CO₂, et d'autres enfin que cela ne provient pas de l'activité humaine.

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les éléments qui nous font dire, au contraire, qu'il se passe bel et bien quelque chose d'inhabituel, que la seule explication raisonnable est l'augmentation très rapide des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère depuis deux cents ans, notamment du CO₂, et que la seule source identifiée de ces émissions supplémentaires est l'utilisation humaine des combustibles fossiles.

Il ne s'agira pas ici d'émettre des opinions, mais de donner des observations empiriques. L'augmentation des températures moyennes est un fait avéré, ainsi que la diminution de la biodiversité. Que la teneur en CO₂ ait augmenté et continue de le faire est le résultat de mesures effectuées régulièrement. Que le CO₂ soit un gaz à effet de serre est vérifié depuis plusieurs siècles par des expérimentations empiriques.

Quand on est scientifique et qu'on a en main toutes ces observations, le problème est de les coordonner dans un schéma cohérent. Car la science n'est pas qu'une affaire de faits: c'est une affaire de sélection et d'interprétation des infinies observations qu'on peut faire du monde. En l'occurrence, le seul schéma cohérent dont nous disposons est l'effet de serre: plus on met de plumes de canard dans la couette, plus elle est chaude. C'est une conclusion simple, directe, et qui a derrière elle plus d'un siècle de travaux scientifiques.

Le climatoscepticisme aboutit à l'inaction. «Ce n'est pas la peine de s'agiter, de toutes façons on n'y peut rien, il faut donc laisser faire les choses.» C'est la position de nombre de politiques et d'industriels, à l'instar de l'administration de Donald Trump. Position véritablement dangereuse, parce que si le travail des scientifiques depuis un demi-siècle a établi quelque chose, c'est bien que les équilibres climatiques et écologiques sont en train de basculer, et que nous sommes à un moment charnière dans l'histoire de l'humanité. C'est justement le moment où il est encore possible d'infléchir l'avenir, et de le rendre plus supportable pour nous et nos descendants, et peut-être même meilleur qu'aujourd'hui!»



1

Il se passe quelque chose

Tout le monde n'est pas d'accord :



Source: Twitter

Et pourtant...

1.1 Des records de chaleur

Les lignes qui suivent devront être ré-écrites chaque année, car chaque année de nouveaux records sont battus. Au moment où nous l'écrivons, avril 2020, voici les derniers :

- Il a fait 45°9 dans le Gard le 28 Juin 2019, la température la plus élevée jamais enregistrée en France
- Il a fait 38°7 à Cambridge le 25 Juillet 2019, la température la plus élevée jamais enregistrée en Grande-Bretagne

- Il a fait 20°75 à la base Comandante Ferraz le 9 Février 2020, la température la plus élevée jamais enregistrée en Antarctique
- Il a fait 21°C à Alert, le 15 Juillet 2019, la température la plus élevée jamais enregistrée dans cette base située à moins de 900 km du pôle Nord

1.2 Évolution des moyennes

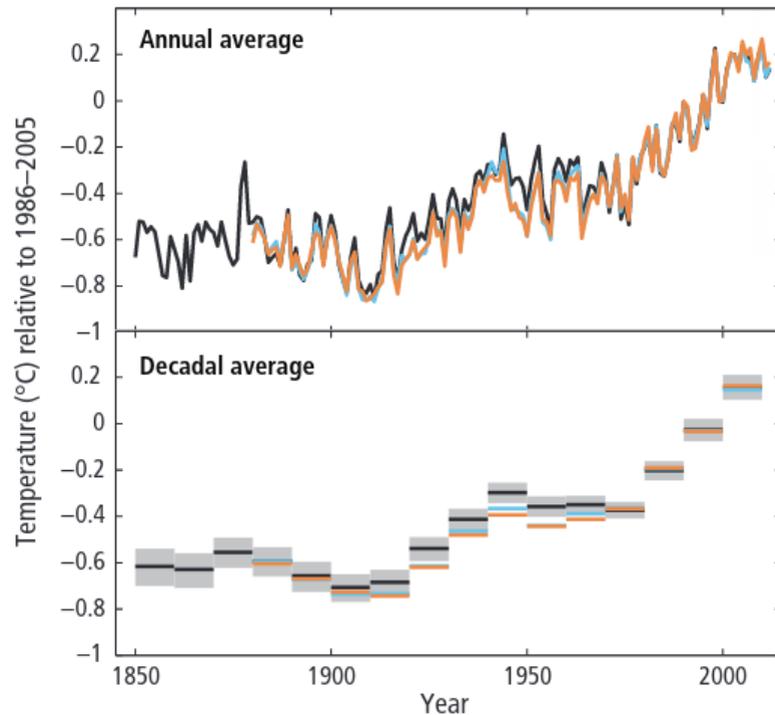
Il s'agit de températures extrêmes dans des endroits localisés. Qu'en est-il des moyennes sur la planète ?

- Entre 2005 et 2019, neuf mois de juillet ont été les plus chauds jamais enregistrés depuis que l'on fait des mesures.
- Le quinquennat 2015-2019 a été le plus chaud jamais enregistré, avec une température moyenne supérieure de 1°1 C à celle du XIXe siècle.
- Le graphique ci-joint, extrait du rapport 2014 du GIEC, montre les changements depuis 1850. On notera que la température a grimpé de 1°C depuis 1920, et que le mouvement s'accélère depuis 1980 (les différentes couleurs correspondent à différentes séries de mesures).



Ce graphique, extrait du rapport 2014 du GIEC, montre les changements de températures moyennes sur le globe depuis 1850.

(a) **Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly 1850–2012**



Évolution de la température depuis 1850 selon différentes séries de mesures

Source: Rapport 2014 du GIEC

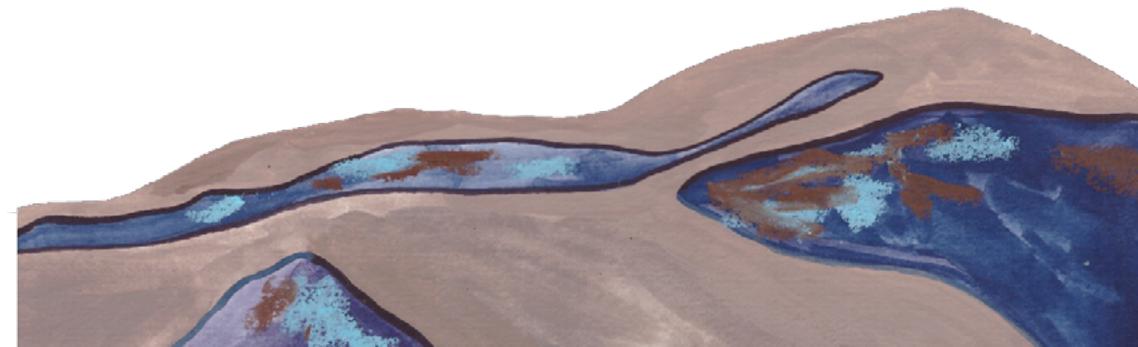
Lecture: Les différentes couleurs des courbes (orange, noir, etc.) correspondent à différentes séries de mesures réalisées par différentes équipes de recherche. Le fait qu'elles soient quasiment identiques nous confirme la fiabilité des résultats.

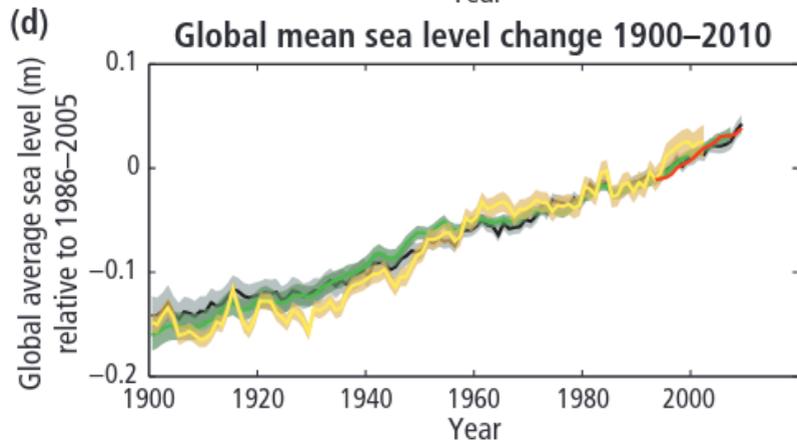
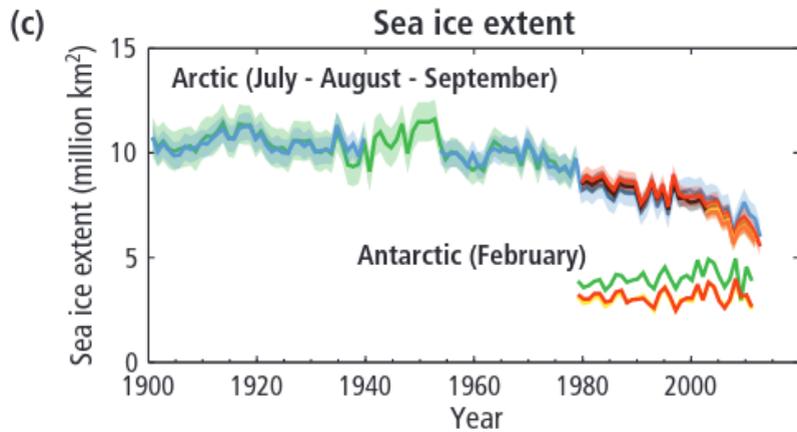
En regardant l'ensemble du mouvement des courbes depuis 1850, on voit que les températures étaient globalement stables jusqu'en 1920 puis se sont réchauffées, allant de $-0,8$ à $+0,2$ degrés par rapport à la température de référence. L'augmentation est particulièrement marquée dans la deuxième moitié du XX^e siècle. On note que la température a grimpé de 1°C depuis 1920, et que le mouvement s'accélère depuis 1980.

La même chose est visible sur le graphique du bas où on fait la moyenne de chaque température annuelle sur 10 ans consécutifs à partir du graphique du haut (d'où l'aspect de la courbe en palier, sans l'aspect dents-de-scie du graphique du haut). L'accélération finale est particulièrement visible.

1.3 Fonte de la banquise

L'augmentation des températures moyennes se traduit par la fonte des glaces des pôles. Le graphique suivant, extrait du même rapport, montre le rétrécissement de la banquise et l'élévation du niveau des mers depuis un siècle (les différentes couleurs représentent à nouveau des séries de mesures différentes, menées par des équipes indépendantes).





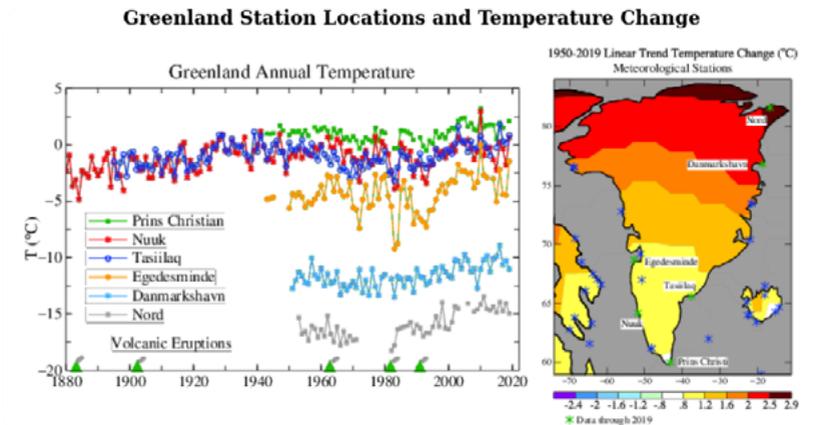
Évolution de la surface couverte par la banquise et du niveau des mers

Source: Rapport 2014 du GIEC

On voit par exemple que la banquise en Arctique couvrait environ 10 millions de km² jusqu'en 1960, puis amorce un déclin progressif qui nous amène aujourd'hui autour de 5 millions de km². Deux fois moins qu'il y a 60 ans.

Vous serez peut-être surpris.e de ne pas voir de mouvement similaire en Antarctique. Comme nous l'avons déjà observé, l'Antarctique et l'Arctique réagissent différemment: l'un est un continent (comme l'Europe ou les Amériques) isolé des autres par un océan qui fait le tour du globe, l'autre est une mer intérieure entre l'Europe, l'Asie et le Groenland. La glace de l'Antarctique est un glacier, celle de l'Arctique une banquise, et cela amène à des comportements différents.

Vous trouverez des courbes tenues à jour régulièrement et beaucoup d'autres renseignements sur le site de l'Université Columbia¹³. Nous en extrayons notamment la figure suivante, qui montre que c'est en Arctique que l'on a relevé les changements de température les plus importants, et ce d'autant plus qu'on monte vers le Nord (ce qu'indique le dégradé de rouge dans la carte du Groenland à droite):



Évolution de température à différents points du Groenland

Source: Site de l'Université Columbia

¹³ — <http://www.columbia.edu/~mhs119/>

1.4 Peut-il faire plus froid sur une planète qui se réchauffe?



Question 1: Certains météorologues disent que 2012 a été une année exceptionnellement chaude en France. Pourtant, en février 2012, la Saône a gelé à Lyon, pour la première fois depuis 1985. Est-ce compatible?

Question 2: Le 26 février 2015, dans un épisode désormais célèbre¹⁴, le sénateur américain Inhofe apportait au Sénat une boule de neige qu'il venait de ramasser à l'extérieur, et faisait remarquer qu'il faisait très froid, et qu'il fallait vraiment ne pas avoir les yeux en face des trous pour prétendre que l'année 2014 avait été particulièrement chaude. Après quoi il lançait la boule vers le président de séance. C'est vrai qu'il avait fait très froid ce jour-là à Washington. Est-ce un argument recevable contre le réchauffement climatique?

Réponse 1: Oui! Si on dit que 2012 a été une année chaude, on veut dire que la moyenne des températures prises sur l'année et sur le territoire était plus élevée que les années précédentes. Mais cela n'empêche pas qu'à certains moments et à certains endroits il y ait eu des températures exceptionnellement basses!¹⁵

Réponse 2: Non, comme ci-dessus: on peut avoir une moyenne élevée avec certaines mesures basses. D'ailleurs, comme le dit le journaliste de l'article, ce même jour de février, s'il faisait particulièrement froid à Washington, il faisait par ailleurs particulièrement chaud en Floride (30°C)! D'où l'importance en sciences de ne pas juger des situations uniquement sur des cas particuliers.

Résumé

- ♦ La planète se réchauffe, c'est-à-dire que les températures augmentent régulièrement depuis 1850.
- ♦ Il s'agit des moyennes saisonnières autant que des températures extrêmes et le mouvement s'accélère.
- ♦ Le mouvement est aussi visible via la fonte remarquable de la banquise arctique.

¹⁴ — Un épisode que vous trouverez raconté ici: <https://time.com/3725994/inhofe-snowball-climate/>

¹⁵ — Voir pour les détails (et pour quelques belles photos) <https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/lmg378-2012-02-27.xml>

2

Et du côté des vivants?

2.1 bouleversements du monde vivant

Quand on fait chauffer de l'eau dans une casserole, des courants se forment pour répandre la chaleur dans le liquide (c'est ce qu'on appelle la convection), puis l'eau s'agite de manière désordonnée avant de commencer à bouillir. Nous n'en sommes pas là, mais c'est une règle générale: à mesure que l'atmosphère se réchauffe, elle s'agite de plus en plus, ce qui signifie que les événements extrêmes, températures (froids ou canicules) ou précipitations (cyclones, sécheresses) vont être plus fréquents et plus accentués.

Ces changements vont impacter les êtres vivants de manière spectaculaire. En 2019, un Martien aurait pu voir des incendies dévaster trois continents: l'Amérique (en Amazonie), l'Asie (en Sibérie) et l'Australie (dans le Sud-Est). Dans ce dernier pays, les feux ont détruit la faune et la flore sur 186 000 km² (à titre de comparaison, la Grande-Bretagne a une superficie de 230 000 km²), brûlant les arbres et les animaux. Les rares survivants sont promis à disparaître, faute d'habitat et de nourriture.

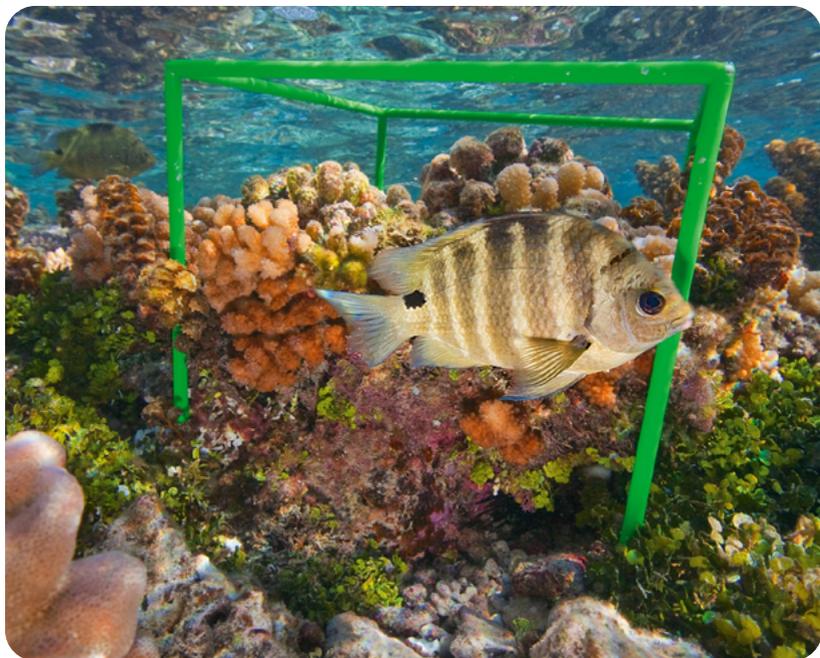


Source: <https://www.theguardian.com/australia-news/2019/dec/31/australia-bush-fires-towns-devastated-and-lives-lost-as-blazes-turn-the-sky-red>

Ces incendies ont frappé les imaginations, ainsi que les images de koalas rescapés dont on ne pouvait rien faire car leur habitat avait disparu. Mais le plus souvent, ces transformations passent inaperçues, en raison de la perte de mémoire entre générations humaines. C'est ce qu'on appelle **«l'effet cliquet»**: nous considérons comme « normale » la situation que nous avons connue dans notre jeunesse. Ceux qui roulaient en voiture dans les années 1960 se souviennent qu'il fallait s'arrêter tous les cent ou deux cents kilomètres pour nettoyer son pare-brise, recouvert d'une véritable bouillie d'insectes volants. Les sportifs qui faisaient du vélo à la campagne l'été devaient fermer la bouche pour ne pas avaler d'insectes. Ceux qui roulent aujourd'hui n'ont pas ce souvenir, et ne se demandent pas où sont passées ces nuées de mouches, moustiques, hannetons, fourmis, abeilles ou guêpes. Entre-temps la réalité a changé.



2.2 Mesurer le vivant



©David Liittschwager. Source: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2010/02/life-ecosystems-one-cubic-foot/>

Comment peut-on s'en rendre compte au-delà de nos expériences subjectives individuelles à vélo ou en voiture? Quantifier la « biodiversité » est un exercice beaucoup plus difficile que de mesurer la température ou la pression de l'air.

Une tentative intéressante a été faite par un photographe nommé Liittschwager.¹⁶ Dans des milieux divers il a procédé à l'expérience

¹⁶ — Le livre a été publié par Chicago University Press, et vous pourrez trouver certaines photos du procédé sur la toile.

suivante: placer une structure métallique cubique, formée uniquement de six arêtes de 30 cm (comme sur l'image ci-dessous parmi les coraux), et photographier tout ce qui passe dans la cage et qui mesure plus d'un millimètre, et ce, en continu pendant 24H. Après cela, l'artiste a regroupé toutes les images de ces organismes vivants sur des planches éblouissantes de richesse et de diversité.

On est tenté de penser que ces planches peuvent suffire à donner une idée complète de la biodiversité à l'endroit considéré. On y voit en effet une incroyable multitude d'êtres vivants... Et pourtant il en manque encore beaucoup! D'abord parce qu'il s'agit de la situation en un jour donné: suivant le temps qu'il fait et les saisons, les populations changent, et il faut songer aussi aux migrants. Il manque tout ce qui vit sous terre: le sol regorge de vie, avec les vers de terre et les champignons. Par construction, il manque tout ce qui a moins d'un millimètre: les bactéries par exemple. Enfin et surtout, il manque toutes les relations qui lient les différentes espèces: elles ont toute leur place assignée dans l'écosystème, et elles ont besoin des autres espèces pour survivre.

La richesse de la faune et de la flore échappera toujours aux mesures. Mais si l'on veut en donner une idée en quelques chiffres, afin de pouvoir communiquer avec des gens assis derrière des bureaux, et documenter, de manière objective, les pertes ou les gains, on utilise le plus souvent:

- Le nombre d'espèces présentes, par catégories (mammifères, insectes, plantes, arbres)
- La surface occupée par l'espèce et le nombre d'individus
- Le poids total des individus constituant l'espèce (ce qu'on appelle la **biomasse**)

Il faut toujours se rappeler que ces chiffres sont saisonniers: certaines plantes ou certains insectes paraissent absents certaines années, où ils subsistent sous forme de graines ou d'œufs. Ces indicateurs, pour insuffisants qu'ils soient, sont bien utiles. Ils permettent de montrer, par exemple, que la forêt amazonienne, où la vie grouille à tous les étages, du sous-sol jusqu'à la canopée, est infiniment plus riche qu'une forêt d'eucalyptus, avec ses feuillages clairsemés et son sol aride. On ne peut pas remplacer l'une par l'autre.

2.3 Biodiversité en déclin

Que nous enseignent ces outils de mesure? Une étude¹⁷ de 2017 montre qu'en Allemagne, la biomasse d'insectes volants était le quart de ce qu'elle était en 1990. Selon l'effet cliquet, ce qui est pour notre génération une perte réelle ne l'est pas pour la suivante, qui se réfère à ce qu'elle voit autour d'elle et a du mal à s'imaginer que la réalité a pu être très différente.

Au niveau mondial, une analyse comparée des données historiques¹⁸ montre que 40% des espèces d'insectes sont menacées d'extinction. En ce qui concerne les mammifères, une étude¹⁹ menée sur 177 espèces montre que toutes ont perdu au moins 30% de leur habitat, et que 40% ont perdu 80% ou plus de leur population. Enfin, la Grande Barrière de Corail vient de subir un épisode de blanchiment massif, le troisième en cinq ans²⁰. Les coraux vivent en symbiose avec des algues, et le blanchiment signifie qu'ils s'en séparent, ce qui conduit à terme à leur mort, et avec eux à la disparition de tout l'écosystème des récifs coralliens, l'un des plus riches et des plus spectaculaires du monde.

17 — <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185809>

18 — <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>

19 — <https://www.pnas.org/content/114/30/E6089>

20 — <https://www.theguardian.com/environment/2020/mar/25/great-barrier-reef-suffers-third-mass-coral-bleaching-event-in-five-years>

Voici la situation actuelle, telle qu'elle figure dans le rapport de 2019 de l'IPBES²¹, l'organisme équivalent au GIEC mais travaillant sur la biodiversité. Pour avoir les chiffres bilan, concentrez-vous sur la moitié droite de l'image.

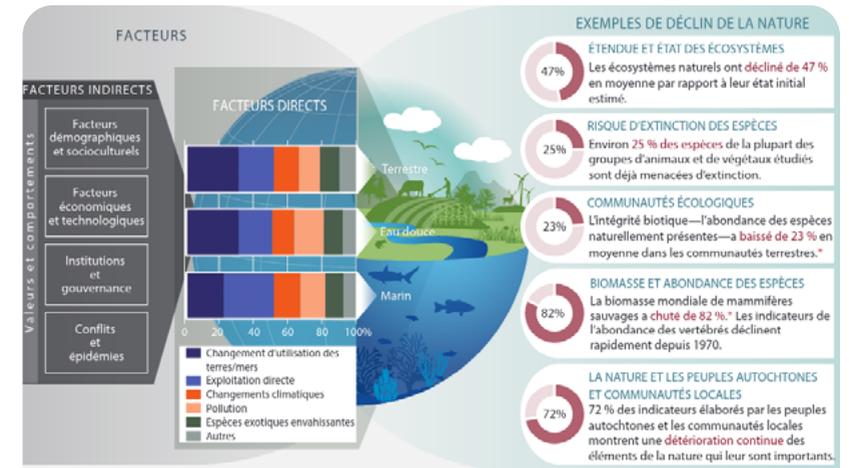


Figure SPM 2 Exemples de déclins observés dans la nature au niveau mondial, soulignant le recul de la biodiversité provoqué par des facteurs de changement directs et indirects.

Exemples de déclins observés dans la nature

Source: Rapport 2019 de l'IPBES

2.4 Climat... ou pollution?

Ces changements ne sont pas dus principalement à la hausse des températures – du moins pas encore! En général, ils sont causés par un premier effet plus direct lié aux activités humaines: **la pollution et la destruction des milieux de vie**. On estime que 75% de l'environnement terrestre et 65% du milieu marin ont été «gravement altérés»

21 — https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_fr.pdf

par les activités humaines, ce qui n'est pas si étonnant quand on sait que l'élevage et l'agriculture occupent plus du tiers de la surface des continents et utilisent les trois quarts des ressources en eau douce²².

Le **rythme de destruction** des espèces animales et végétales est sans précédent depuis la disparition des dinosaures, si bien que les spécialistes parlent dorénavant de «**sixième extinction**».

On pourrait penser que c'est tout bénéfique pour l'espèce humaine, qui aura la planète pour elle toute seule. La pandémie de COVID-19 vient nous démontrer qu'il n'en est rien! La biosphère nous nourrit et nous protège de bien des façons. Les virus étaient sur cette planète bien avant nous, et ils ont trouvé leurs hôtes au fur et à mesure de l'évolution. Si un virus de chauve-souris ou de pangolin voit son hôte disparaître, soit parce qu'il est chassé soit parce que son habitat se rétrécit, il mutera pour trouver un autre hôte. L'homme étant devenu l'espèce la plus abondante et la moins menacée, c'est évidemment l'hôte idéal.

Résumé

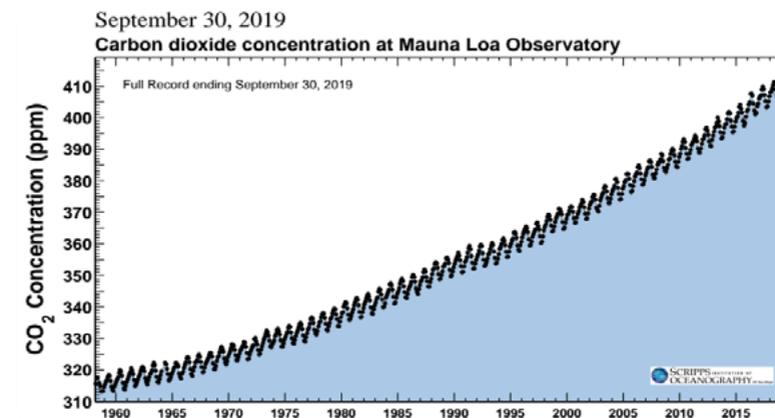
- ✦ Le réchauffement s'accompagne d'un effondrement biologique: beaucoup d'espèces ont disparu, et celles qui subsistent se raréfient
- ✦ La cause directe principale est la pollution et de la destruction de leurs milieux de vie.
- ✦ On mesure ce déclin de la biosphère principalement en comptabilisant le nombre d'espèces existantes, le nombre d'individus par espèce et leur biomasse.

3

Le lien avec le CO₂

3.1 La courbe de Keeling

En 1958, Charles Keeling installait à Hawaï un observatoire météorologique chargé de mesurer la concentration de l'air en CO₂. L'endroit, l'île volcanique Mauna Loa, avait été choisi pour son isolement et son absence de végétation. Les relevés se sont poursuivis sans interruption jusqu'à aujourd'hui, ce qui en fait une base de données particulièrement précieuse et intelligible.



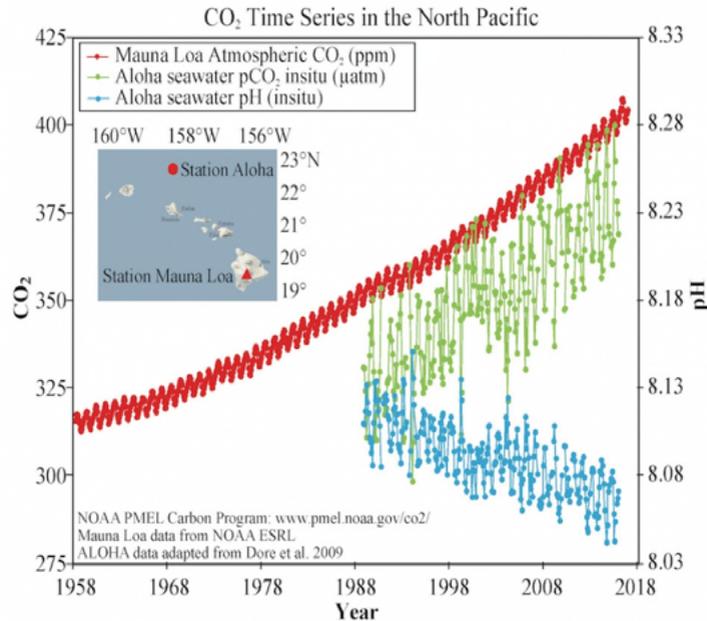
Courbe de Keeling

Source: Site internet de l'Observatoire de Mauna Loa

Le graphique indique qu'au début de l'expérience, la concentration de CO₂ était de 314 ppm. Elle est maintenant de 414 ppm, soit une augmentation de 32% sur toute la période, c'est-à-dire 0,56% par an pendant 50 ans. D'ailleurs, pourquoi la courbe n'est-elle pas parfaitement lisse et a-t-elle cet aspect denté? Ce sont les fluctuations saisonnières

au cours d'une année, dues au cycle du carbone: les plantes sont plus actives l'été que l'hiver!

Vous pourrez vous rendre sur le site de l'observatoire²³ pour trouver les observations à jour. Vous y trouverez également des informations concernant les autres GES, comme le méthane, et l'acidification des océans. Celle-ci n'a été mesurée, toujours autour de Mauna Loa, qu'à partir de 1990, et cela donne ceci:



Data: Mauna Loa (http://ftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/mm_mlo.txt) ALOHA (http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/products/HOT_surface_CO2.txt)
Ref: J.E. Dore et al., 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:12235-12240.

Évolution conjointe de la concentration en CO₂, dans l'air et dans l'eau, et de l'acidité de l'eau

Source: Site internet de l'Observatoire de Mauna Loa

23 — <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

La courbe en rouge, vous la reconnaissez, c'est la teneur en CO₂ de l'air, la courbe en vert c'est la teneur en CO₂ de l'eau, et la courbe en bleu c'est le pH (plus il est bas, plus l'eau est acide, plus les coraux souffrent). Il est clair à la lecture du graphique que ces trois variables semblent évoluer de façon « liée ». C'est ce qu'on appelle une **corrélation**.

3.2 Corrélation et causalité

On croise des corrélations entre variables tous les jours, et inmanquablement lorsqu'on lit la presse. Un détour par un exemple va nous éclairer sur le bon usage à en faire.

Est-ce que fumer cause les cancers du poumon? Sans nier que les fumeurs étaient plus fréquemment atteints de cancer du poumon que les non-fumeurs, le grand statisticien Irving Fisher, fumeur lui-même, affirmait plus précisément que l'un n'était pas la cause de l'autre, mais qu'il existait une cause non encore identifiée, un gène sans doute, qui prédisposait à la fois au cancer du poumon et au tabagisme. L'un n'était donc pas la cause de l'autre, et Fisher concluait qu'empêcher les cancéreux de fumer était une double peine, car cela leur retirait la maigre consolation qui leur restait. À l'inverse, les randonneurs ont plus souvent des entorses que les nageurs, et ils mangent aussi plus souvent du saucisson. Est-ce à dire que le saucisson est un facteur d'entorses?

Vous l'avez compris, dans le cas du cancer du poumon, le tabagisme est une cause directe alors que dans le cas du saucisson et des entorses, il y a un facteur causal caché qui explique les deux observations: la pratique de la randonnée.

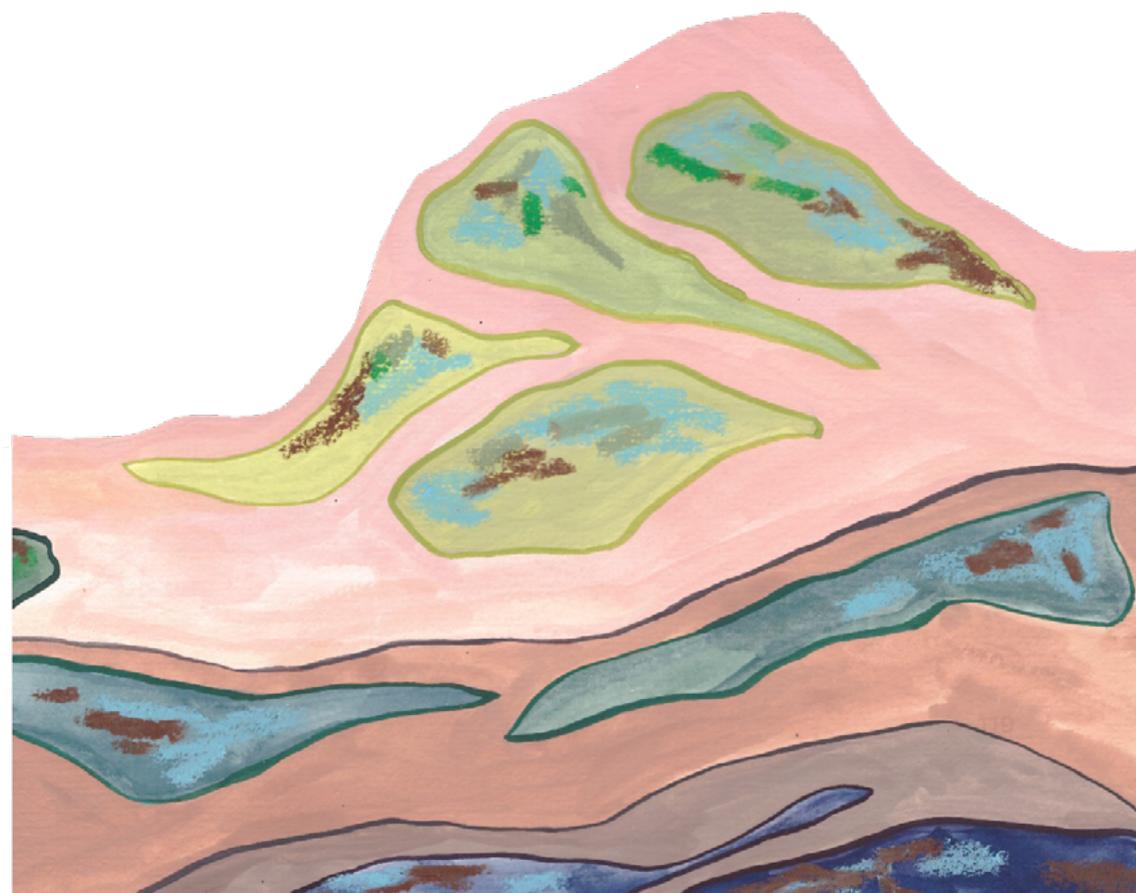
Revenons maintenant à notre question: est-ce le CO₂ qui cause l'élévation de température et l'acidification des océans? On pourrait imaginer que non, et qu'en fait l'une et l'autre soient la conséquence d'une cause commune, aujourd'hui inconnue. En théorie c'est possible, comme pour les entorses et le saucisson. Mais nous avons des

expériences de simulation réalisées en laboratoire qui montrent que le CO₂ crée un effet de serre. Dès le XIXe siècle, bien avant donc que le réchauffement ne fasse sentir ses effets, des savants (Fourier (1824), Tyndall (1861), Arrhénius (1896)) avaient prédit que la teneur de CO₂ dans l'atmosphère affecterait la température (amusant: eux s'intéressaient plutôt au refroidissement qu'au réchauffement, car ils voulaient expliquer les ères glaciaires!). En résumé, le fait que le CO₂ soit un GES ne fait plus de doute et nous savons donc que plus il y en a dans l'atmosphère, plus celle-ci retiendra de chaleur. Nous pouvons aussi tester et **prouver expérimentalement** que le CO₂ se dissout dans l'eau, et acidifie celle-ci.

Outre ces faits observables et expériences de simulation concordants, l'accumulation de CO₂ fournit une explication **simple** au réchauffement et nous ne disposons pas actuellement d'explication alternative. Les phénomènes astronomiques que nous avons discutés dans le premier chapitre par exemple, se déroulent beaucoup plus lentement, et l'orbite de la Terre n'a pas eu le temps de changer en cinquante ans. On pourrait tenter de relier ce faisceau d'indices de façon plus tarabiscotée, ou en invoquant une puissance cachée inconnue. Mais voilà une vieille règle en science (et bien utile aussi dans la vie de tous les jours!): quand on a le choix entre plusieurs explications, la plus simple est jugée la plus probable (ce qu'on appelle d'ailleurs curieusement le rasoir d'Occam). Tant qu'on ne trouve pas d'autre explication qui rende cohérentes nos observations et expériences et qui soit de préférence plus simple (cela pourrait arriver après tout!), il faut accepter que le CO₂ (et les autres GES) soit la cause du réchauffement climatique et de l'acidification des océans.

Résumé

- ♦ Les mesures disponibles, dont la fameuse courbe de Keeling, attestent de la corrélation entre température, CO₂ et acidité des océans.
- ♦ Au-delà d'une simple corrélation, le modèle d'effet de serre par accumulation de CO₂ dans l'atmosphère rend cohérent les expériences de simulations en laboratoire et les observations.
- ♦ L'approche scientifique consiste donc à adopter ce modèle, tant qu'il n'y en a pas de plus convaincant.



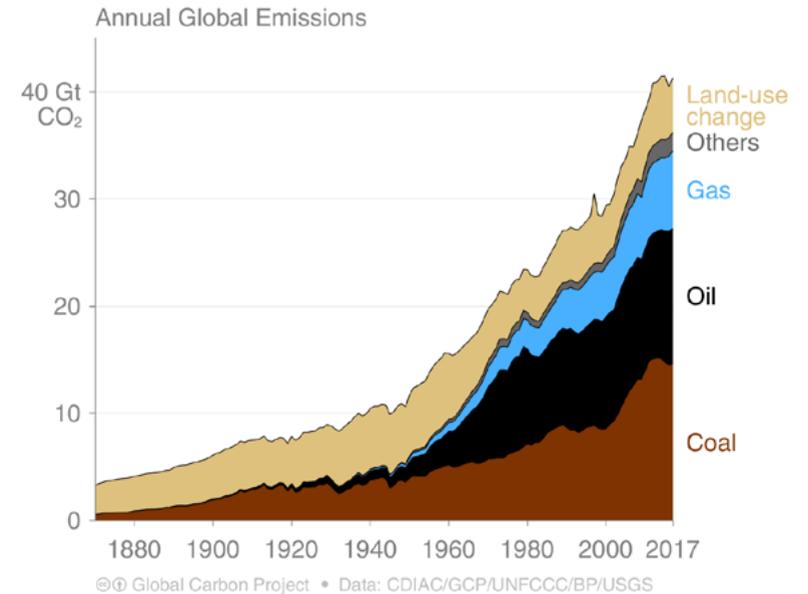
4

Le lien avec les activités humaines

La proportion de CO₂ dans l'air était de 280 ppm avant 1850, elle est aujourd'hui de 417 ppm. D'où vient le CO₂ qui s'est accumulé dans l'atmosphère? En soi, ça n'est pas une question simple. Les éruptions volcaniques, par exemple, rejettent du CO₂. De tout ce que nous connaissons, la seule différence des deux derniers siècles dans le remplissage et le vidage de la baignoire carbone, c'est l'utilisation des **combustibles fossiles**. On pourrait en théorie envisager un autre dérèglement biologique du cycle du carbone. Mais nous n'en avons aucune trace, ni aucune raison de penser qu'il y en ait.

Le graphique suivant donne les émissions humaines par source depuis 1880²⁴. Notons qu'il s'agit de gigatonnes (Gt) de molécules de CO₂ et non pas d'atomes de carbone seul. Pour avoir l'équivalent en gigatonnes d'atomes de carbone, il faut en gros diviser par quatre (3,67 exactement). Les 40 Gt de CO₂ qu'on a atteint en 2017 correspondent à environ 10 Gt d'atomes de carbone. On peut alors rapprocher ce graphique de celui de la leçon précédente (le cycle du carbone).

24 — On trouvera d'autres graphiques, détaillés et actualisés, sur le site du Global Carbon Project: https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/2019_COP25_GCP_CarbonBudget_gpeters.pdf?gRkQ71BSsg8JYWP_2LFGg6zKKfHeTHEj



Évolution des émissions annuelles de CO₂

Source: Global Carbon Project

Jusqu'en 1950, c'est l'utilisation du sol (agriculture, déforestation, bois) qui est la principale responsable des émissions. Ces émissions ont par exemple lieu lorsqu'on déboise une forêt pour brûler le bois comme combustible de chauffage, ou lorsqu'on assèche des marais pour y construire des villes. Depuis la fin du XIXe siècle, on observe un lent décollage des combustibles fossiles: d'abord le charbon, puis le pétrole. A partir de 1950, l'économie mondiale est entièrement dominée par les combustibles fossiles, le gaz apparaît, et les émissions décollent véritablement: elles sont **multipliées par quatre en 70 ans!**

Est-ce que cela suffit à déséquilibrer les stocks de carbone atmosphérique à l'échelle de la planète entière? Oui. Dans un cycle naturel des atomes de carbone, les émissions sont de l'ordre de 210 Gt de carbone (120 pour les continents et 90 pour les océans). En lisant le graphique précédent, on voit que l'activité humaine injecte 9 à 10 Gt d'atomes

de carbone supplémentaires par an. Ce n'est pas négligeable, et cela suffit à perturber le cycle naturel. Pour reprendre la comparaison de la baignoire, on ouvre le robinet de plus en plus grand et pendant plusieurs années. L'eau coule plus fort et il n'y a pas à s'étonner que le niveau s'élève.

Résumé

- ♦ Le seul changement en émissions de carbone des deux derniers siècles est celui de l'utilisation des combustibles fossiles.
- ♦ Ces émissions ne sont pas marginales et sont d'un ordre de grandeur suffisant pour dérégler le cycle à l'échelle planétaire.

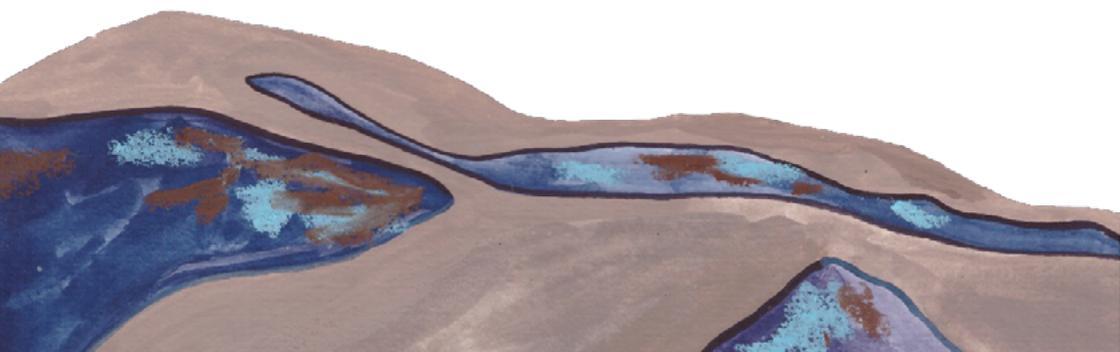


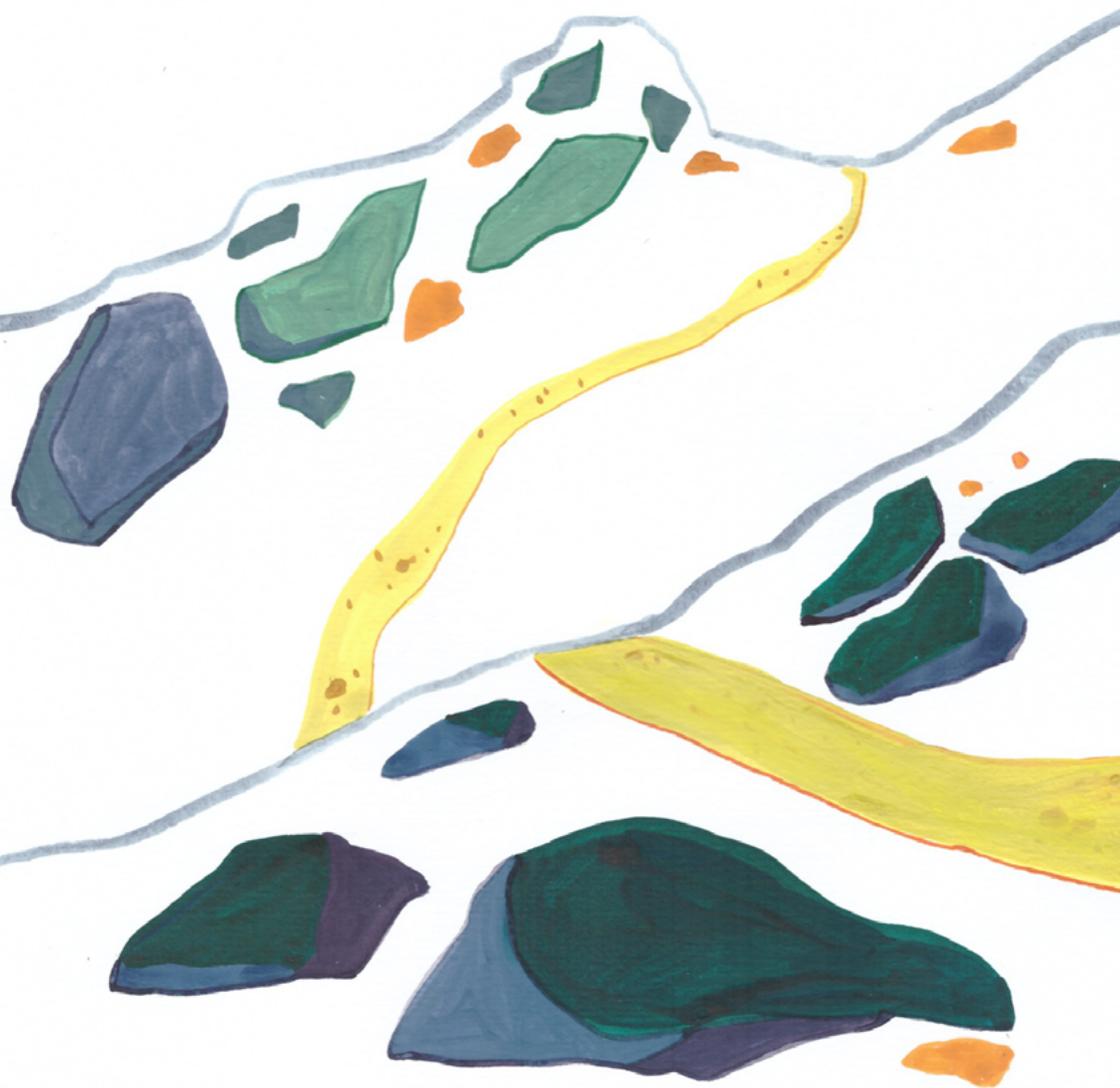
Conclusion

Si l'on approche le problème en scientifique, on peut dire que le réchauffement climatique est avéré et qu'il est dû aux émissions humaines de CO₂ par la combustion de fossiles. On ne voit pas d'autre cause possible à une augmentation aussi rapide de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Par ailleurs, on assiste aussi à une disparition accélérée de nombreuses espèces vivantes, aujourd'hui principalement due à la destruction et pollution de leurs lieux de vie, demain certainement amplifiée par les conséquences du réchauffement climatique.

Et d'un certain point de vue, c'est une excellente nouvelle! Car ce réchauffement, comme nous le verrons, risque d'avoir des conséquences catastrophiques s'il se poursuit. Si ce n'était pas le CO₂, nous serions à la merci d'une cause que nous ne connaissons pas et sur laquelle nous ne pourrions pas grand-chose.

Mais comme c'est le CO₂, on peut agir: si l'on arrive à diminuer la quantité présente dans l'atmosphère, on amènera certainement une baisse des températures. Il est crucial de comprendre que nous ne sommes pas impuissants et c'est bien pour cela que l'on se casse la tête à faire des sciences: pour trouver des moyens d'agir.





6

**Et maintenant,
où allons-nous?
Comprendre les
scénarios du GIEC**



Introduction

« Ayant compris le fonctionnement du climat et le moment de bascule hors du commun que nous vivons, il est légitime de s'interroger: où cela va-t-il nous entraîner et pouvons-nous essayer d'influencer la trajectoire à venir?

Pour répondre à ces questions, il serait certainement utile de savoir, pour chaque choix de société possible, ce qui nous attendra climatiquement parlant. De se projeter dans les futurs possibles. C'est ce que nous allons discuter dans ce dernier chapitre.

L'accord de Paris, signé en 2015, demande à tous les États signataires d'agir en sorte que le réchauffement moyen, par rapport aux temps préindustriels, soit moindre que 2°C en 2100, et de préférence voisin de 1,5°C. Comment est-on arrivé à ce consensus, et comment s'est-on fixé cet objectif, sachant que nous en sommes déjà à 1,1°C? Alors qu'on a tant de mal à prévoir le temps qu'il fera au-delà d'une ou deux semaines, peut-on vraiment faire des prédictions sérieuses sur le climat qui régnera dans cent ans? Nous allons voir comment c'est possible et discuter les projections les plus connues établies par le GIEC, Groupe International d'Expert sur le Climat.

Le GIEC est l'organisme qui s'occupe de collecter et de rassembler les travaux des différents centres de recherche qui travaillent sur le climat. Il publie régulièrement des rapports qui font le point sur nos connaissances et sur ce que sera l'avenir, en fonction de ce que nous faisons aujourd'hui et demain. Ces rapports sont disponibles en ligne, consultables par tout un chacun. Ils constituent une base de travail indispensable pour les collectivités et les entreprises qui doivent planifier leur développement à moyen ou long terme.»

Questions pour s'échauffer

- Question 1: Les quantités de CO₂ émises dans l'atmosphère par les activités humaines se sont envolées avec la révolution industrielle. De toute la quantité émise depuis deux siècles, quelle proportion a été émise dans les trente dernières années: 1/8, 1/4 ou 1/2? Réponse: 1/2
- Question 2: Sur la trajectoire actuelle «business as usual», le GIEC prévoit un réchauffement de 4°C ou davantage en 2100. Il s'agit d'un réchauffement moyen sur la planète. En ce qui concerne l'Arctique seul, de combien serait le réchauffement moyen: 2°C, 6°C, 13°C? Réponse: 13°C
- Question 3: Sur la trajectoire actuelle «business as usual», le GIEC prévoit une élévation du niveau des mers de 1 à 2 cm par an jusqu'en 2100. Suivant la même étude, si les émissions s'arrêtaient à cette date, le niveau des mers pendant le XXII^e siècle (1) baisserait de 1 à 2 cm par an (2) resterait stable (3) croîtrait de 4 à 10 cm par an. Réponse: (3) - croîtrait de 4 à 10 cm par an
- Question 4: quand un glaçon fond dans un verre d'eau, l'eau ne déborde pas. Alors pourquoi devrait-on s'inquiéter de la fonte de la banquise et de l'élévation du niveau de la mer? Réponse: En effet ce n'est pas la fonte de la banquise qu'il faut relier à l'élévation du niveau des mers, même si les deux sont des conséquences du réchauffement. L'élévation du niveau des mers est due à la dilatation thermique de l'eau (plus chaude, elle occupe un volume supérieur) à la fonte des calottes glaciaires, comme les glaciers des Alpes mais aussi et surtout le Groenland ou l'Antarctique (**90% de la glace mondiale se trouve en Antarctique!**). Toute la glace qui y est stockée repose sur une plaque terrestre continentale: si cette glace fond, son eau douce viendra se déverser et s'ajouter à celle des océans.

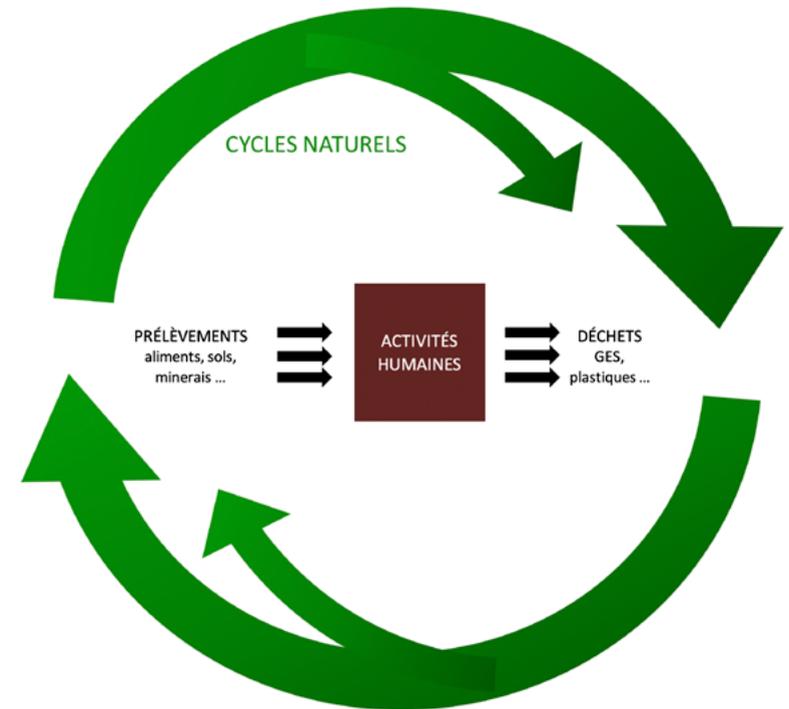


1

Comment fait-on les prévisions?

Le climat est un produit de la biosphère, c'est-à-dire que le climat ne serait pas ce qu'il est sans les interactions avec les êtres vivants. La biosphère est le théâtre de cycles naturels, physiques ou biologiques, que l'humanité perturbe en prélevant des ressources (animaux et végétaux pour l'alimentation, minéraux pour l'industrie) et en rejetant des déchets, notamment des GES, notamment du CO₂. On peut se représenter cela de manière sommaire par le schéma suivant:

Le climat est donc l'effet combiné de deux causes: les **cycles naturels** d'une part; les **activités humaines** (et notamment les émissions de GES) d'autre part. Nous considérons les cycles naturels macroscopiques comme indépendants de la volonté humaine et les physiciens et biologistes savent les caractériser par des équations d'évolution. Mais les activités humaines relèvent de décisions individuelles ou collectives que nous pouvons quelquefois orienter mais pour lesquelles rien, ou presque, ne peut être déterminé en avance. Les cycles font l'objet de prédictions, les activités humaines futures ne peuvent faire l'objet que de conjectures.



Cela ne poserait pas de problème pour prédire le climat des décennies à venir si les humains n'ajoutaient qu'une goutte d'eau à la grande mécanique naturelle du climat. Mais comme nous l'avons vu, depuis deux siècles, les activités humaines ne sont plus du tout négligeables par rapport aux grands cycles naturels et ont un impact significatif sur le climat. Comment donc prédire le climat si celui-ci résulte à la fois de cycles macroscopiques prévisibles et d'actions humaines indéterminées?

La solution adoptée par la communauté scientifique consiste à séparer le problème en deux. On commence par se fixer un certain nombre de **scénarios possibles** pour les activités humaines. Puis, dans cha-

cun de ces scénarios, on fait les calculs sur la façon dont les grands cycles vont se comporter. Les résultats des projections climatiques dépendent donc du scénario retenu, et ne sont pas des prévisions à proprement parler, puisqu'elles ne prédisent pas le scénario, mais le prennent comme entrée dans leurs calculs. C'est pour marquer cette différence que l'on parle de **projections** plutôt que de prévisions.

1.1. Les scénarios

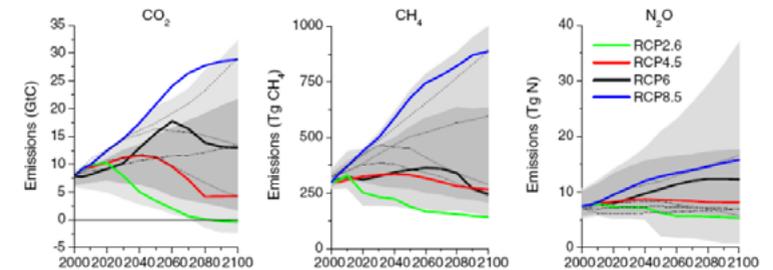
Comme vous vous en doutez, le nombre de scénarios imaginables est infini. Heureusement, tous les détails ne sont pas importants si l'on cherche à connaître l'évolution du climat. Le paramètre le plus déterminant pour le climat, c'est bien sûr la quantité de gaz à effet de serre (GES) relâchée dans l'atmosphère. On peut donc considérablement simplifier le problème en envisageant chacun des scénarios uniquement selon la quantité d'émissions de GES associée.

Ces **scénarios d'émissions** sont maintenant standardisés. On les appelle les Representative Concentration Pathways (Trajectoires Représentatives de la Concentration), en abrégé **RCP**, caractérisés chacun par une évolution possible de la quantité de GES présente dans l'atmosphère d'ici à la fin du siècle. Ils sont au nombre de quatre, du plus pessimiste, le RCP 8.5, au plus optimiste, le RCP 2.6, en passant par le RCP 4.5 et le RCP 6.

À quoi se rapportent les chiffres de 8.5 ou 2.6? Le chiffre indique le forçage radiatif atteint en 2100 suivant ce scénario, par exemple 8,5 Watt/m² dans le scénario RCP 8.5, c'est-à-dire le déséquilibre entre l'énergie reçue par la Terre et l'énergie renvoyée dans l'espace.

Les voici :

RCP Emission Trajectories



Évolutions projetées des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O dans les différents scénarios étudiés

Source: Rapport 2014 du GIEC

Lecture: Les quatre scénarios sont représentés par des courbes de couleur et les trois graphiques représentent trois gaz à effet de serre, avec le plus connu, le CO₂, à gauche. Le RCP 8.5 correspond au climat le plus chaud puisque plus le forçage est grand, plus la planète se réchauffe. C'est cohérent avec ce qu'on voit sur les trois graphiques: la courbe en bleu est la plus haute pour les 3 gaz à effet de serre représentés. Notez que la courbe verte commence plus haut que la courbe noire en émissions de CO₂ et ce n'est pas une erreur: pour réduire les émissions futures, il faut considérablement s'activer aujourd'hui, quitte à émettre plus de CO₂ à court-terme.

La décision de se limiter à quatre scénarios est récente. Auparavant, les chercheurs ont exploré une grande variété de scénarios, et les dessins montrent où les RCP se situent par rapport à la littérature antérieure: 95% de celle-ci se trouve dans le grisé sombre, et 5% dans le grisé léger. On voit bien comment ils sont représentatifs: le RCP 8.5 représente le « business as usual » (BAU), sans aucune politique climatique. Le RCP 2.6 correspond au contraire à une politique de réduction drastique des émissions dès aujourd'hui.

Résumé

- ♦ Le climat est l'effet combiné de deux causes: les cycles naturels, prévisibles; et les activités humaines, que nous ne savons pas prédire.
- ♦ Les climatologues procèdent donc en se fixant un certain nombre de scénarios possibles pour les activités humaines, dans lesquels ils simulent les phénomènes naturels.
- ♦ Les 4 scénarios de référence (RCP) sont indexés en termes d'émissions totales, jusqu'au scénario RCP 8.5 qui correspond au prolongement de la trajectoire actuelle.
- ♦ Le chiffre indique le forçage radiatif atteint en 2100. Plus le chiffre est haut, plus le réchauffement sera important.

1.2 Les calculs

L'avantage d'avoir fixé des scénarios-type est que l'on peut ensuite passer la main aux mathématiciens, physiciens, biologistes et autres scientifiques, qui vont pouvoir faire leurs calculs sans se soucier de savoir d'où viennent les émissions et comment elles sont produites. Connaissant les quantités de GES émises par les activités humaines à chaque instant, ils vont calculer le temps qu'il fera, en utilisant les équations habituelles de la météorologie.

Mais vous répondrez peut-être: chacun sait que les prévisions météorologiques ne sont guère fiables au-delà d'une ou deux semaines. Comment donc se fier à des prévisions climatiques qui s'étendent jusqu'à la fin du siècle?

La réponse est que le météorologiste à la radio doit annoncer le temps exact qu'il fera à un point et une date précise. À l'inverse, une climatologue propose des **prédictions moyennes** sur plusieurs années à venir et de façon **probabiliste**. C'est la clé de la différence entre météo et climat.

La situation est analogue aux lancements d'un dé. À chaque lancer, au moment où le dé quitte la main du lanceur, sa trajectoire est parfaitement déterminée, et peut être calculée en appliquant les lois habi-

tuelles de la physique. Imaginez le météorologiste comme la personne qui s'occupe de calculer la trajectoire avant que le dé ne touche le tapis, et la climatologue comme la personne chargée de dire en moyenne les faces sur lesquelles le dé s'arrêtera le plus souvent. L'un peut prédire la position, dire par exemple à quel endroit le dé touchera le tapis, l'autre peut donner les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat. L'un et l'autre apportent des réponses précises, l'un et l'autre sont scientifiques, l'un et l'autre utilisent les équations physiques du mouvement des vents, des précipitations, etc. mais la seconde ne cherche pas à obtenir une prédiction à proprement parler, mais une description probabiliste des futurs possibles.

Est-ce qu'une telle réponse statistique, qui ne dit pas ce qui va se passer mais qui énonce les résultats possibles et donne une probabilité pour chacun d'eux, est utile? Bien sûr que oui! À choisir entre deux dés, mieux vaut jouer avec celui qui a 50% de chances de faire 6 que celui qui n'en a que 10%.



En résumé, si nous appliquons cela au sujet du réchauffement climatique:

	Le météorologiste	La climatologue
Cherche à prédire	La température et les précipitations exactes de la date future qui nous intéresse	Les températures et précipitations moyennes les plus probables sur la période future qui nous intéresse
Propose une réponse	Exacte: une seule météo est prédite pour chaque date	Probabiliste: montre les différentes moyennes possibles sur des périodes de plusieurs années, et les probabilités associées à chaque possibilités
Ne cherche pas à prédire	Le scénario d'émissions de GES dues aux activités humaines. Il est pris comme donnée dans ses calculs, comme le type de lancer du dé.	Le scénario d'émissions de GES dues aux activités humaines. Il est pris comme donnée dans ses calculs, comme le type de lancer du dé.
Effectue ses calculs	Une seule fois avec le maximum de précision	De nombreuses fois, en modifiant chaque fois légèrement les conditions initiales pour tenir compte des erreurs possibles. Le bilan des résultats permet d'identifier les résultats les plus probables.
Utilise les équations	De la physique du climat	De la physique du climat

Pour chacun des scénarios, les climatologues donnent les probabilités que le réchauffement moyen soit de 1, 2, 3, 4°C ou même plus. Choisir une politique et s'y tenir, c'est choisir un des dés. Ne rien faire (business as usual), c'est choisir le dé estampillé RCP 8.5. Le climatologue ne vous donnera pas le climat qui prévaudra en 2100, mais la liste des climats possibles et la probabilité de chacun d'eux.

1.3 Vers 2100 en accélérant

Comme nous l'avons vu à plusieurs reprises, le CO₂ émis en excédent aujourd'hui ne commencera à être éliminé naturellement que dans un millier d'années. Même si nous arrêtons net toutes nos émissions dès aujourd'hui, le stock de CO₂ présent dans l'atmosphère restera sensiblement inchangé pendant dix siècles et tout le troisième millénaire aura à faire avec l'atmosphère que nous lui aurons léguée.

Mais, même dans ce cas, cela ne voudrait pas dire que le climat resterait inchangé pendant cette période. Et cela pour plusieurs raisons. D'abord, comme le second chapitre nous l'a fait comprendre, le «rembourrage» du sac de couchage atmosphérique de la Terre des dernières décennies a créé un déséquilibre structurel entre énergie reçue et énergie renvoyée. Le climat terrestre est donc en train d'évoluer naturellement vers un **nouveau point d'équilibre**, plus chaud, auquel nous ne sommes pas encore.

En outre, le réchauffement va en **s'accélération**. Cela est dû au fait que certains mécanismes, parfois très lents, finissent par en déclencher d'autres qui agissent en retour sur les premiers et les renforcent. Par exemple, le réchauffement en siècle 1 fait fondre une partie de la banquise, qui ne sera plus là en siècle 2. Or la glace réfléchit la lumière du soleil, et c'est autant d'énergie qui était renvoyée vers l'espace sans être interceptée par les GES (ce ne sont pas des infrarouges). En siècle 2, il y aura donc moins de lumière solaire réfléchi, et davantage de lumière absorbée par la surface et renvoyée sous forme de rayonnement infrarouge. Ce rayonnement sera intercepté par les GES, viendra réchauffer davantage l'atmosphère, et faire fondre encore davantage

de banquise. Le réchauffement s'accélère donc d'année en année. Dans le cas des glaces polaires, leur fonte complète peut s'étaler sur plusieurs siècles et faire monter le niveau des mers de plusieurs dizaines de mètres.

On connaît plusieurs mécanismes naturels de ce genre, qui tous accélèrent le réchauffement au-delà de 2100. On n'en connaît pas qui le ralentissent. C'est pourquoi les rapports du GIEC, dans le cadre du RCP 8.5, parlent d'une élévation du niveau des mers de 1,5 à 2 cm par an jusqu'en 2100, puis de plusieurs centimètres par an au-delà. Il n'en dit pas plus, car on ne sait pas à quel rythme les glaces vont fondre. La fonte complète de la glace antarctique, à elle seule, élèverait le niveau des mers de 70 mètres (ce qui n'est heureusement pas pour tout de suite).

1.4. Les effets de seuil

Les calculs actuels incorporent essentiellement tous les mécanismes dont la communauté scientifique juge qu'ils ont ou auront une influence sur le climat dans les deux ou trois siècles qui viennent. Ils n'incorporent pas des mécanismes connus, mais sur lesquels on n'a pas assez d'informations pour faire des prévisions (la chute d'un astéroïde sur la Terre, une nouvelle guerre mondiale). Une exception cependant : tous les scénarios font l'hypothèse que d'ici 2100 on aura inventé des processus industriels permettant d'extraire le CO₂ de l'atmosphère et de le séquestrer, et que ces processus pourront être déployés à l'échelle nécessaire. Nous en sommes très loin à ce jour, et à dire vrai on ne voit guère comment y arriver. Il n'empêche que cette industrie hypothétique joue un rôle fondamental dans les réductions d'émissions prévues par les RCP de 2.5 à 6.

Parmi les mécanismes physiques ou biologiques qui sont bien compris en théorie, mais sur lesquels on n'a pas suffisamment d'informations pour établir des prédictions certaines, il faut enfin mentionner les **effets de seuil**. En anglais, on parle de « tipping points », points de bascule. Le principe est le même que lorsqu'on charge une barque petit à

petit : elle s'enfoncé chaque fois un peu plus mais elle flotte toujours, et tout d'un coup, une petite charge supplémentaire la fait couler. Passer certains seuils peut conduire à des changements brutaux et colossaux à l'échelle d'un continent entier. Concernant le réchauffement climatique, les scientifiques qui ont réalisé la carte suivante en ont identifié neuf :

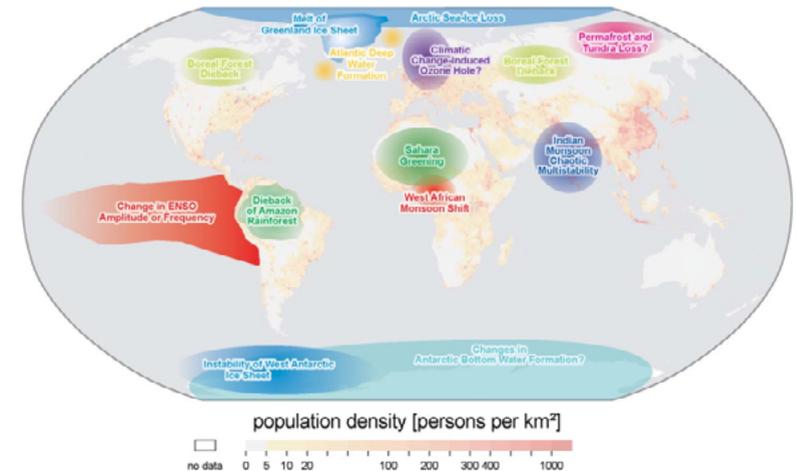


Fig. 1. Map of potential policy-relevant tipping elements in the climate system, updated from ref. 5 and overlain on global population density. Subsystems indicated could exhibit threshold-type behavior in response to anthropogenic climate forcing, where a small perturbation at a critical point qualitatively alters the future fate of the system. They could be triggered this century and would undergo a qualitative change within this millennium. We exclude from the map systems in which any threshold appears inaccessible this century (e.g., East Antarctic Ice Sheet) or the qualitative change would appear beyond this millennium (e.g., marine methane hydrates). Question marks indicate systems whose status as tipping elements is particularly uncertain.

Neufs effets de seuil potentiels impactant le climat planétaire

Source : « Tipping elements in the Earth's climate system », article publié dans la revue PNAS²⁵

25 — https://www.pnas.org/content/pnas/105/6/1786.full.pdf?wptouch_preview_theme

Prenons le cas de la mousson, un régime qui amène des précipitations importantes pendant une partie de l'année, le reste de l'année étant sec. C'est l'alternance entre saison sèche et saison des pluies autour de l'équateur, en Afrique de l'Ouest et en Inde. Ce que dit l'article, c'est qu'il y a un risque que ces régimes disparaissent avec le réchauffement climatique. Pour l'Inde, cela conduirait à une sécheresse généralisée, avec toutes les conséquences pour l'alimentation et la survie des populations que vous pouvez imaginer.

Notez néanmoins que ces effets de seuil n'amènent pas tous à plus de sécheresse: en Afrique par exemple, cela conduirait au verdissement du Sahara, dorénavant arrosé par des pluies. Ce serait une des rares conséquences positives du réchauffement climatique! Vous pouvez aller en lire davantage dans l'article original.

1.5 Pourquoi 2100?

Pourquoi donc avoir retenu la date de 2100? L'idée est de trouver un compromis en montrant à la fois l'ampleur des changements à venir (dont les plus impressionnants n'advieront pas dans 10 ans mais dans 50 ou 60 ans) tout en étant suffisamment proche pour que les personnes vivant aujourd'hui se sentent concernées.

Contrairement aux générations qui ont aujourd'hui le pouvoir de décision sur nos systèmes économiques et sociaux, ceux qui sont nés après 2000 vivront toute leur vie professionnelle dans un climat qui se réchauffe, et ont une bonne chance que leur vieillesse se déroule à la fin du siècle dans les conditions décrites par les rapports du GIEC.

Résumé

- ♦ Pour chaque scénario d'émissions humaines, les climatologues proposent une projection statistique, qui indiquent les trajectoires possibles et leurs probabilités associées.
- ♦ Cette incertitude tient en partie à la difficulté de calculer l'ensemble des paramètres affectant le climat, mais aussi à des phénomènes d'accélération, qui augmentent l'ampleur des changements, et plus encore aux effets de seuil, à partir desquels l'intégralité du système peut être bouleversée.
- ♦ Les projections mettent le cap sur 2100, qui est un horizon à la fois suffisamment proche pour se sentir concernés et suffisamment lointain pour prendre la mesure de l'ampleur des changements à venir.



2

Qu'est-ce que le GIEC?

Il existe beaucoup de centres de recherche sur le climat, tels que l'ISPL (Institut Pierre-Simon de Laplace) à Paris et beaucoup d'institutions qui font de la prospective, comme la NASA aux États-Unis²⁶. Mais le **GIEC**, Groupe International d'Experts sur le Climat, est unique en ce qu'il représente un **consensus scientifique et politique international**.

Il a été fondé par l'Organisation des Nations Unies et l'Organisation Météorologique Internationale en 1988, sous le nom anglais «IPCC», pour International Panel on Climate Change²⁷, dans le but de «fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade».

Il ne s'agit pas d'un centre de recherche, mais d'une organisation intergouvernementale qui a 195 États membres. Pour remplir son mandat, elle fait appel à des scientifiques, mais leurs conclusions sont toujours soumises aux États membres, seuls habilités à les valider. Elle publie un rapport tous les six ans (chacun d'eux se décomposant en plusieurs sous-rapports), en plus de rapports sur des sujets particuliers. Il y a eu cinq rapports, en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2014, et on en attend un en 2022.

²⁶ — Ces organisations ont des sites très intéressants sur le sujet comme : <https://www.climat-en-questions.fr/> ou <https://climate.nasa.gov/>

²⁷ — Son site est le <https://www.ipcc.ch/> et une partie est en français : <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>

Les chercheurs qui collaborent aux rapports le font sur la base du volontariat et ne sont pas rémunérés. Ils représentent toutes les disciplines, toutes les régions du globe et la rotation est importante²⁸.

Leur travail consiste à compiler les différents résultats obtenus par les différentes équipes de chercheurs de part le monde, et d'en extraire les informations pertinentes. La procédure de validation est longue et complexe, entre les auteurs du rapport et les chercheurs dont ils rendent compte des résultats, puis entre les auteurs du rapport et les politiques qui représentent leurs gouvernements et défendent leurs intérêts (songez à l'Arabie Saoudite, qui, économiquement parlant, n'a pas vraiment intérêt à remettre en question les émissions liées à la consommation d'hydrocarbures). Les scientifiques peuvent aussi se proposer comme relecteur des rapports et faire des remarques auxquelles le GIEC doit répondre. Chaque rapport résulte donc d'un accord scientifique et politique : toutes les informations publiées ont été validées par la communauté scientifique dans son ensemble et par les autorités politiques des pays concernés au terme d'un processus ouvert et transparent, fonctionnant sans financement privé. C'est un énorme avantage permettant de faire autorité, même si l'on peut craindre que ce consensus ne soit obtenu en minimisant les risques encourus.

Résumé

- ♦ Le GIEC est une institution intergouvernementale représentant 195 États membres.
- ♦ Il a pour mandat de faire la synthèse des études scientifiques disponibles sur l'évolution climatique.
- ♦ Le GIEC produit des rapports environ tous les 6 ans, qui font l'objet d'un consensus scientifique et politique et dont découle leur autorité sur la scène internationale.

²⁸ — <https://medialab.sciencespo.fr/en/news/cartographier-les-auteurs-du-giec/>



3

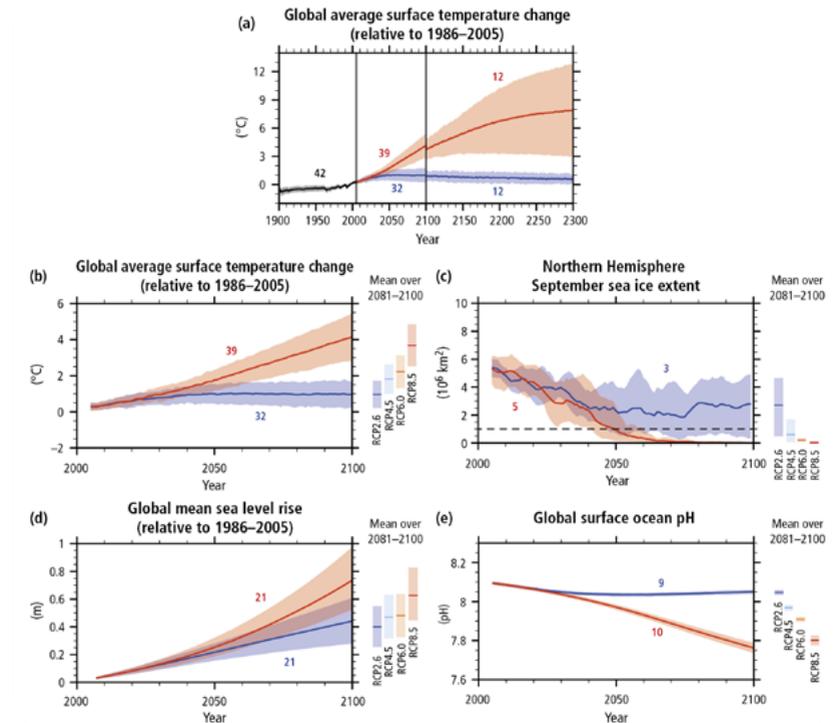
Comment lire les rapports du GIEC?

3.1 Cartographies du réchauffement attendu

Les rapports sont disponibles en ligne, sur le site du GIEC. Le rapport 2014, par exemple, en comporte en fait quatre: l'un présente les projections, c'est-à-dire le déroulement du réchauffement jusqu'en 2100 suivant les quatre scénarios retenus, l'autre sur la manière dont les activités humaines pourraient s'y adapter, le troisième sur la manière dont on pourrait l'atténuer, et un rapport de synthèse. Chacun de ces quatre rapports commence par un «résumé pour les décideurs» qui présente l'essentiel, et se termine par les annexes techniques.

En ce qui concerne les projections, elles sont toujours de nature probabiliste et elles sont donc présentées avec leur probabilité de réalisation.

La page 59 du Rapport de Synthèse présente les projections en ce qui concerne la température moyenne, l'extension de la banquise, l'élévation du niveau des mers et le pH des océans. La voici:



Évolution de différents marqueurs du réchauffement climatique dans deux scénarios extrêmes

Source: Page 59 du Rapport 2014 du GIEC

Exercice d'application:

Commençons par le premier graphique qui s'affiche sur la page du rapport, tout en haut.

Q1: Il indique la température moyenne annuelle à la surface du globe. Deux trajectoires possibles y sont représentées. L'une correspond au scénario RCP 2.6, l'autre au scénario RCP 8.5. D'après vous, quelle courbe est celle du scénario 2.6 et quelle courbe est celle du scénario 8.5?

Q2: On lit sur le graphique que la courbe rouge atteint la valeur 8 en 2300. Est-ce à dire qu'il fera 8 degrés Celsius en moyenne en 2300 dans ce scénario?

Q3: On voit aussi que la première partie des deux courbes est identique, en noire. À quoi correspond-elle?

Q4: Zoomons sur la courbe rouge. On voit tout autour une zone rouge pâle. À quoi correspond-elle, à votre avis? Et comment se comporte-t-elle au fil des années?

Q5: Lorsqu'on regarde la courbe bleue, on voit aussi la zone bleutée correspondant à un intervalle de confiance de 95% mais pas le même élargissement au fil des années. Est-ce que la première partie de cette leçon peut nous fournir des explications possibles?

La suite de la page 59 du rapport présente 4 autres graphiques dont l'évolution du niveau des mers, du pH des océans et de la surface de banquise arctique.

Q6: Sans les regarder de près, vous savez certainement déjà à quoi vont ressembler ces graphiques. Dans le(s)quel(s) de ces trois graphiques vous attendez-vous à voir la courbe rouge au-dessous de la courbe bleue?

R1: En effet, la rouge présente l'augmentation de température la plus élevée et correspond donc au scénario 8.5.

R2: Non bien sûr: le titre nous dit que, comme pour d'autres graphiques que nous avons vus dans les leçons précédentes, l'axe vertical du graphique indique les valeurs en comparaison avec la moyenne sur la période de référence 1986-2005. Ainsi dans le scénario 8.5, il fera en l'an 2300 8 degrés Celsius de plus qu'en 1986-2005.

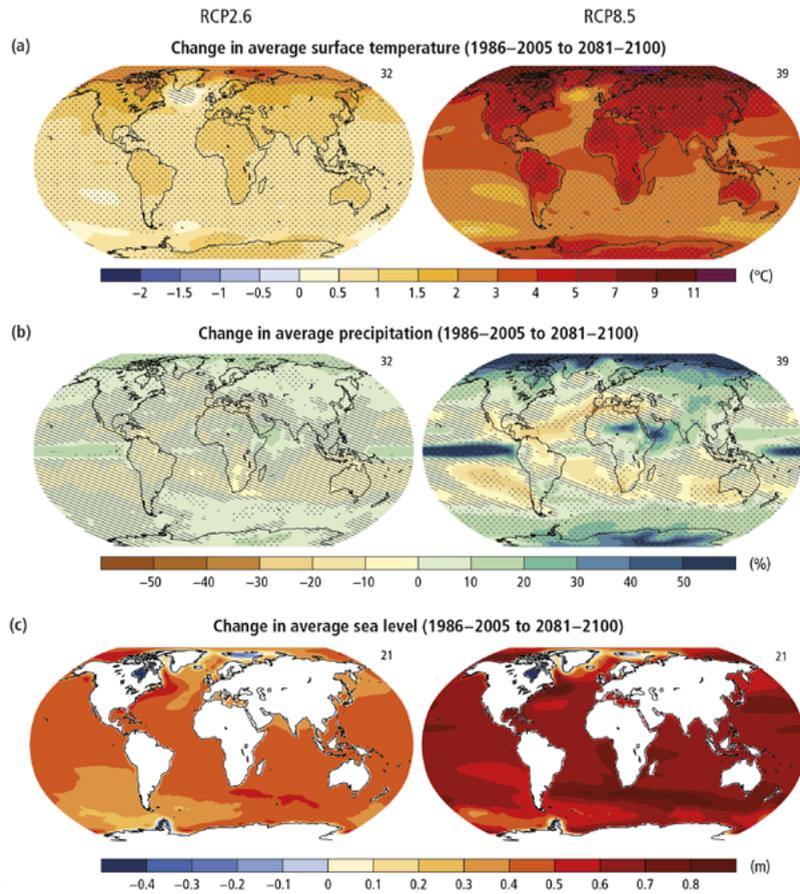
R3: Aux températures observées dans le passé. Plutôt rassurant qu'il s'agisse des mêmes courbes pour les deux scénarios!

R4: Il s'agit d'une zone dans laquelle que le GIEC estime que la température future se trouvera à 95% de chances. On parle aussi d'un intervalle de confiance statistique. Rappelez vous du lancer de dé du climatologue: le climatologue sait qu'il ne peut pas prédire parfaitement la température future mais réalise de nombreuses simulations pour voir les valeurs que celle-ci a le plus de chance de prendre. La ligne rouge foncé est la moyenne obtenue en utilisant les calculs de plusieurs équipes de recherche différentes (leur nombre est indiqué sur par des chiffres de la même couleur). On voit que moins d'équipes ont fait des projections au-delà de l'année 2100: on lit 39 jusque 2100 puis 12 au-delà. On voit aussi que la zone s'élargit avec les années. C'est logique: plus on essaie de prédire loin dans le futur, moins on est sûrs de nos projections, donc plus la zone où on s'attend à atterrir est grande.

R5: Comme nous l'avons discuté dans la première partie de la leçon, le réchauffement amorcé au cours de dernières décennies va se poursuivre et risque même de s'accélérer. Prédire les effets «boule de neige» est plus difficile que dans le scénario 2.6 où les émissions sont fortement limitées très rapidement. C'est même drastiquement plus compliqué lorsqu'on passe des effets de seuil.

R6: Sans surprise, la courbe rouge est sous la bleue s'agissant de la surface de banquise, puisque plus il fera chaud, plus vite va fondre la banquise. Elle est aussi sous la courbe bleue pour le pH océanique, puisque plus le pH est faible, plus les océans sont acides ce qui correspond à davantage de CO₂ dissout dans les océans.

Ces projections globales sont détaillées géographiquement. Prenons par exemple la page 61:



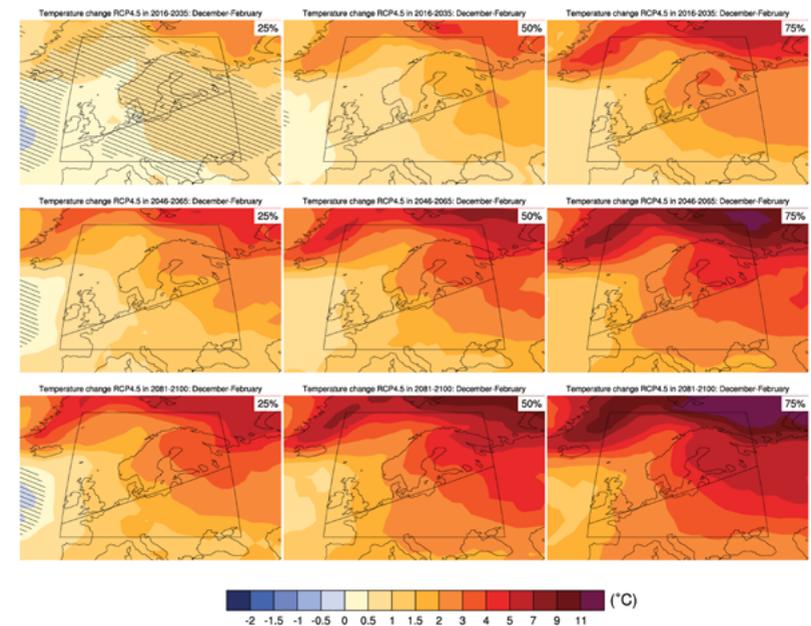
Évolutions climatiques régionales dans deux scénarios extrêmes

Source: Page 61 du Rapport 2014 du GIEC

On voit tout de suite les **disparités régionales**. Pour le scénario 8.5, l'élévation moyenne des températures sur le globe est prévue pour 4°C, mais en Arctique elle sera de 13°C. Et curieusement, au Sud du

Groenland, il y a une région où la température moyenne sera stable, et pourra même baisser dans le scénario RCP 2.6, dans le cadre d'un réchauffement général! Intéressante aussi la toute dernière figure: cherchez donc à placer New York, Londres, Kolkata et Tokyo sur la carte...

Dans le Rapport consacré à la physique du changement climatique, vous trouverez des cartes détaillées par grandes régions du monde. Si par exemple vous vous intéressez à l'Europe, voici le programme en ce qui concerne les températures d'hiver en Europe du Nord, suivant un scénario optimiste, où l'on a entrepris de limiter les émissions de GES, le RPC 4.5:



Évolutions des températures en Europe dans le scénario RCP 4.5

Source: Rapport 2014 du GIEC

Pour ne pas vous perdre dans tous ces dégradés de rouges et oranges, scrutez d'abord les titres: ils indiquent les dates. La première ligne montre donc trois projections pour l'hiver des années 2016-2035; la seconde ligne pour 2046-2065; la dernière pour 2081-2100. Et sans surprise: les cartes deviennent de plus en plus rouges à mesure qu'on descend. Car même dans ce scénario optimiste, il fera plus chaud chaque année.

Comme d'habitude les résultats de ces projections sont statistiques: on propose donc une projection médiane et une «zone de confiance» autour de cette moyenne où on s'attend à trouver les résultats. Ainsi, les valeurs médianes attendues sont représentées dans la colonne centrale, avec les trois cartes portant le chiffre 50%. À quoi correspondent les cartes avec 25% à gauche et celles avec 75% à droite? Elles indiquent l'étendue de la zone de confiance autour de la moyenne attendue. Plus précisément, une carte 25% signifie que le GIEC estime qu'il y a moins de 25% de chances d'avoir un réchauffement plus faible que celui représenté sur la carte. De façon analogue, une carte 75% signifie que le GIEC estime qu'il y a 75% de chances d'avoir un réchauffement plus faible que celui représenté sur la carte. Ces trois cartes permettent donc de dessiner une zone de confiance dans laquelle on s'attend à atterrir.

Exercice d'application

Parmi les affirmations suivantes, lesquelles sont vraies? Lesquelles sont fausses?

L'Angleterre et la France ont plus d'une chance sur deux de connaître un réchauffement de plus 0,5 degrés Celsius entre 2016 et 2035.

Dans tous les cas, le réchauffement est d'autant plus important qu'on regarde au Nord et vers l'Europe Centrale.

Il y a 75% de chances que le réchauffement fasse plus de 3 degrés en 2081-2100 en France et en Allemagne.

L'hiver arctique a une chance sur deux de se réchauffer de 9°C au moins à la fin du siècle.

Réponses:

Vrai, c'est ce que montre la carte 50% de la première ligne

Vrai, c'est ce qu'on voit par le dégradé de couleurs sur toutes les cartes

Faux: la carte 75% indique que 75% des simulations donne un réchauffement inférieur ou égal à 2-3 degrés. Les 25% restants prédisent un réchauffement supérieur.

Vrai. C'est ce qu'on lit sur la carte centrale de la dernière ligne.

Les réchauffements sont donnés par rapport à la fin du XX^e siècle, il faut donc rajouter 0,6°C pour trouver les réchauffements par rapport à l'ère préindustrielle. On voit que, même dans ce scénario optimiste, alors que le réchauffement moyen est de 4°C sur la région, l'hiver arctique a une chance sur deux de se réchauffer de 9°C au moins à la fin du siècle.

Vous trouverez sur le site de l'IPCC²⁹ l'évolution des températures d'été en Europe du Nord, et l'évolution des précipitations. Il s'agit d'un atlas des projections, et vous y trouverez des cartes analogues pour toutes les régions du monde.

3.2 Conséquences du réchauffement pour les sociétés humaines

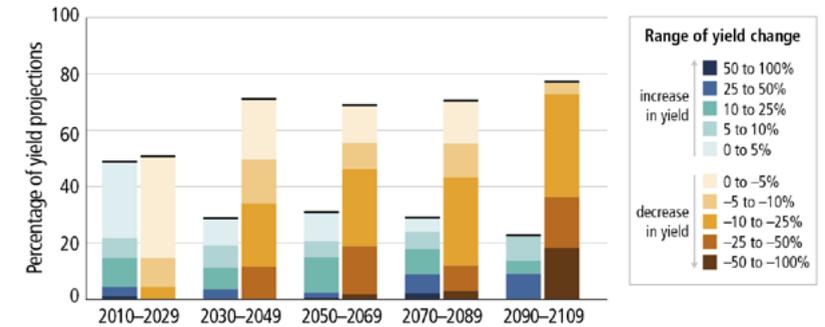
Ce réchauffement n'est pas sans conséquence. Voici par exemple, en page 69 du rapport de synthèse, l'évolution prévue des **rendements**

29 — <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/atlas-of-global-and-regional-climate-projections/>

des cultures de céréales au cours du XXI^e siècle, par rapport aux rendements de celles-ci en 2000. Le tableau rassemble les résultats d'un millier de programmes de recherches menés sous des hypothèses variées, et il indique la progression ou au contraire le déclin des rendements de vingt ans en vingt ans. Certaines études concluent à une progression (en bleu), d'autres à une régression (en ocre-marron), et le tableau indique la proportion de chacune avec leurs conclusions. On voit que la grande majorité est pessimiste, voire très pessimiste :

Alors qu'environ la moitié des études escomptent des augmentations de rendements au cours de la période 2010-2029 (la barre des bleus est presque au même niveau que la barre des ocres), seules 20% et quelques s'attendent à des augmentations sur la période 2090-2109.

Parmi les études nombreuses qui s'attendent à des baisses de rendements à partir de 2030, près de 20% concluent à une chute des rendements de plus de moitié à la toute fin du siècle (voir la portion marron la plus foncée sur la période 2090-2109), et près de 40% à une chute de plus de 25% (si l'on additionne les deux ocres-marron les plus foncés sur cette période).

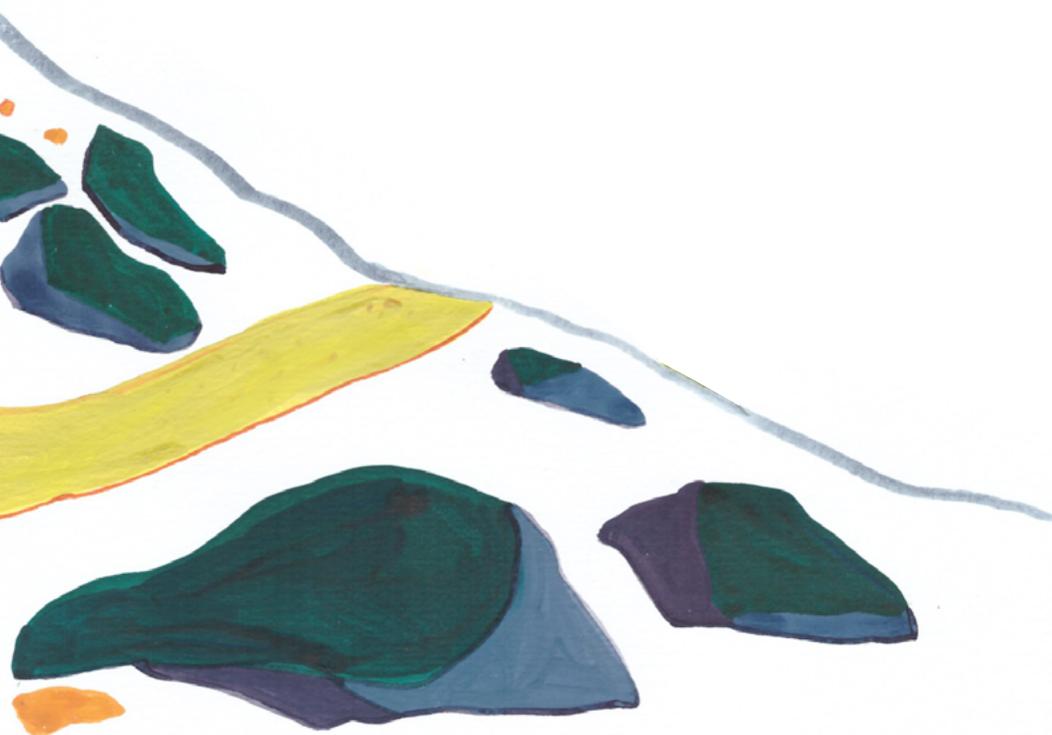


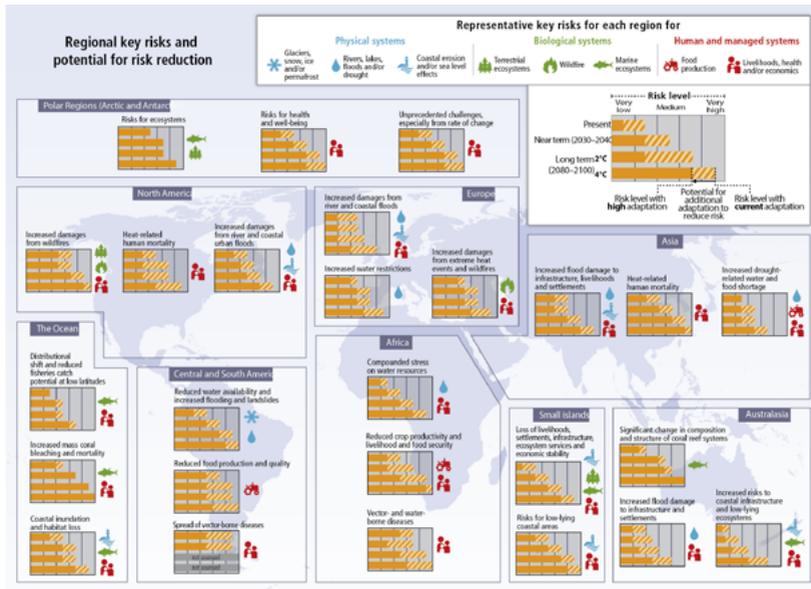
Distribution des projections des rendements agricoles selon différentes études scientifiques

Source: Page 69 du Rapport 2014 du GIEC

Par ailleurs, les cartes que nous avons vues représentent des moyennes, et ne contiennent pas toute l'information. Au fur et à mesure que la moyenne s'élève, les **événements extrêmes** deviennent plus fréquents. Les canicules se succèdent, chacune battant le record établi par la précédente. Des cyclones de plus en plus violents naissent sous les tropiques, et les années de sécheresse se prolongent ailleurs. Chaleur et sécheresse se combinent pour donner de gigantesques incendies, comme ceux qui ont ravagé l'Australie en 2019 et 2020.

Le GIEC a tenté de dresser la liste des différents risques qui accompagnent le réchauffement: les incendies et les inondations ne sont que les plus visibles. Les résultats sont contenus dans les deux rapports sur l'atténuation et l'adaptation. On peut les résumer dans un tableau synthétique que voici, et qui est expliqué page 65 du Rapport de Synthèse:





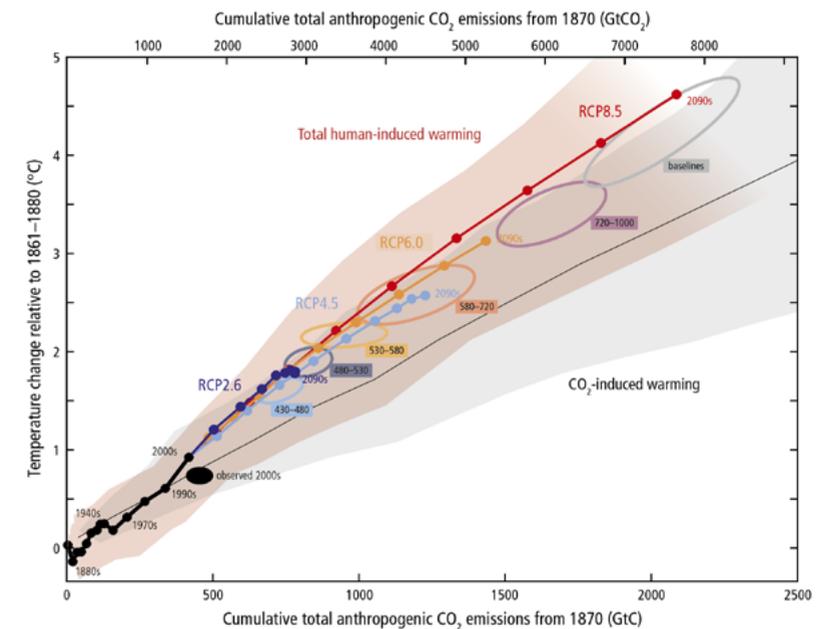
Projections des risques par région

Source: Page 65 du Rapport 2014 du GIEC

Les risques sont évalués sous deux hypothèses, un réchauffement de 2°C par rapport à 1985 à la fin du siècle par, et un réchauffement de 4°C. Pour chacune d'elles, il donne le risque à court terme (2030-2040) et le risque à long terme (2080-2100). C'est expliqué dans le petit encart en haut à droite. Juste au-dessus, vous trouverez la classification des risques par type. On voit par exemple que l'Asie sera particulièrement touchée (pénurie alimentaire due à la sécheresse, destruction des villes et des infrastructures par des inondations, et mortalité directe due à la combinaison de chaleur et d'humidité, comme nous l'avions signalé dans la leçon sur la biologie). L'Amérique du Nord ne sera pas épargnée non plus, frappée notamment par la mortalité directe.

Conclusion

Pour conclure ce chapitre, il est bon de rappeler les hypothèses correspondant aux quatre scénarios retenus, les RCP 2.6, 4.5, 6 et 8.5. Ce sont essentiellement des scénarios d'émission de GES, et ils sont représentés par le graphique suivant, avec les réchauffements correspondants:



Émissions cumulées de CO₂ et élévation de la température moyenne par scénario

Source: Rapport 2014 du GIEC

En abscisse (en haut du graphique) on lit la quantité totale de CO₂ émise par les activités humaines depuis 1870, et en ordonnées le réchauffement correspondant. Les dates sont indiquées directement sur la figure. On voit par exemple que sur le scénario 8.5, BAU, l'humanité est supposée avoir émis en 2090 plus de 7500 Gigatonnes de CO₂, alors qu'aujourd'hui nous en sommes encore autour de 2000 Gigatonne. Est-il vraiment réaliste de penser qu'on va multiplier cette quantité par 4 ou 5 en moins d'un siècle? Un scénario comme 2.6 n'est-il pas beaucoup plus raisonnable? Est-il si difficile d'y arriver?

Hélas, ce n'est pas si simple, et la suite du cours s'attachera à cette question. Mais dès maintenant nous pouvons noter qu'entre 1970 et 2000, le stock de carbone a été doublé: on a émis autant de CO₂ en trente ans que durant tous les siècles précédents. Et on peut donc retourner la question: est-ce réaliste de penser que cette tendance s'inversera spontanément?



Remerciements

Merci aux relectures, corrections et contributions de Charly Berthet, Meyha Camara, Dominique Dron, Marie Ekeland et Jacques Treiner.

Ce cours n'en est qu'à sa première édition, et nous avons à cœur qu'il s'améliore! Si vous repérez des coquilles, des erreurs ou des oublis, ou si vous avez des suggestions d'amélioration ou d'ajout, écrivez-nous à coursclimat@2050.do.

